

**КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НАБЕРЕЖНОЧЕЛНИНСКИЙ ИНСТИТУТ**

Д.Л. Карелин, А.В. Болдырев, С.В. Болдырев

**ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ AVL CRUISE M
В ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ**

Учебно-методическое пособие

**Набережные Челны
2024**

УДК 004.94:533.6(075.8)

ББК 31.311.3я73

К22

*Печатается по решению
учебно-методической комиссии
Высшей технической школы НЧИ КФУ
протокол № 2 от 26.02.2024.*

Рецензенты:

д.т.н., доцент, профессор кафедры бизнес-информатики и
математических методов в экономике НЧИ КФУ

А.К. Розенцвайг.

к.т.н., доцент кафедры высокоэнергетических процессов и агрегатов
НЧИ КФУ **И.Д. Исрафилов**

К22 Учебно-методическое пособие к практическим занятиям
по дисциплине «Моделирование теплофизических и
электрохимических процессов в топливных ячейках и
электролизёрах» для студентов по направлению подготовки
13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» и по дисциплине
«Динамика и регулирование гидропневмосистем» для
студентов по направлению подготовки 15.04.02
«Технологические машины и оборудование» / Д.Л. Карелин,
А.В. Болдырев, С.В. Болдырев. – Набережные Челны: Изд-во
Набережночелнинского института (филиала) ФГАОУ ВО
«Казанский (Приволжский) федеральный университет», 2024. –
77 с.

Методические указания могут быть использованы при
проведении практических занятий по дисциплине «Моделирование
теплофизических и электрохимических процессов в топливных
ячейках и электролизёрах» для студентов по направлению подготовки
13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» и по дисциплине
«Динамика и регулирование гидропневмосистем» для студентов по
направлению подготовки 15.04.02 «Технологические машины и
оборудование».

УДК 004.94:533.6(075.8)

ББК 31.311.3я73

© Д.Л. Карелин, А.В. Болдырев, С.В. Болдырев, 2024

© Набережночелнинский институт КФУ, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

1. СВЕДЕНИЯ ОБ ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТАХ БИБЛИОТЕКИ «ГАЗОДИНАМИКА» ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА AVL CRUISE M .	4
1.1 КОМПРЕССОР (COMPRESSOR)	4
1.2 КАМЕРА (PLENUM).....	8
1.3 ТРУБОПРОВОД ДЛЯ ГАЗА (GAS FLOW PIPE)	11
1.4 УВЛАЖНИТЕЛЬ (HUMIDIFIER).....	18
1.5 ТЕПЛООБМЕННИК СО СТОРОНЫ ГАЗА (GAS HEAT EXCHANGER CORE)	23
1.6 ВЕНТИЛЯТОР (FAN).....	33
1.7 СОПРОТИВЛЕНИЕ (RESTRICTION)	35
1.8 СЕПАРАТОР (WATER SEPARATOR).....	40
1.9 СИСТЕМНАЯ ГРАНИЦА (SYSTEM BOUNDARY)	42
1.10 ГРАНИЦА ПО МАССОВОМУ РАСХОДУ ГАЗА (MASS FLOW BOUNDARY)	46
1.11 ТОПЛИВНЫЙ БАК (FUEL TANK)	47
2. ПРИМЕРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ AVL CRUISE M.....	49
2.1 ТЕЧЕНИЕ ГАЗА ЧЕРЕЗ МЕСТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ (ОТВЕРСТИЕ)	49
2.2 ЗАПОЛНЕНИЕ КАМЕРЫ ГАЗОМ	63
ЛИТЕРАТУРА.....	76

1. Сведения об основных компонентах библиотеки «Газодинамика» программного пакета AVL Cruise M

К элементам библиотеки «Газодинамика» программного пакета AVL Cruise M относятся:

- компоненты состояния (для них определяются параметры состояния газа – давление, температура, влажность и др.): камера, трубопровод для газа, увлажнитель, системная граница;
- компоненты переноса (для них определяются параметры движения газа – массовый или объемный расход газа и др.): компрессор, теплообменник со стороны газа, вентилятор, сопротивление, сепаратор, граница для массового расхода.

Для каждого элемента можно задать следующие **условия теплообмена** (коэффициент теплоотдачи задается явно или определяется по аналогии Рейнольдса):

- 1) модель с заданными температурой и площадью стенки (тепловой «порт» не используется);
- 2) модель с заданными массой, материалом и начальной температурой стенки (можно подключиться через тепловой «порт» к элементу типа «Стенка»);
- 3) модель с заданными массой, материалом, начальной температурой стенки, а также с определенными коэффициентом теплоотдачи и температурой радиатора (тепловой «порт» не используется);
- 4) без дополнительных условий теплообмена (однако реализовать теплообмен можно путем использования теплового «порта» элемента).

1.1 Компрессор (Compressor)

Компрессор сжимает газ, уменьшая его удельный объем.

Потребляемая мощность компрессора N , Вт, зависит от массового расхода газа \dot{m} , кг/с, и разности энтальпий на выходе h_2 и на входе h_1 компрессора, Дж/кг.

На последнюю влияют степень повышения давления, температура газа на входе T_1 , К, и изоэнтропический КПД компрессора $\eta_{s,C}$.

Потребляемая мощность описывается следующим образом:

$$N = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1). \quad (1.1.1)$$

Разность энтальпий определяется как:

$$h_2 - h_1 = \frac{1}{\eta_{s,C}} \cdot C_p \cdot T_1 \cdot \left[\left(\frac{p_{02}}{p_{01}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right], \quad (1.1.2)$$

где C_p – средняя между входом и выходом компрессора удельная теплоемкость газа при постоянном давлении, Дж/(кг·К);

p_{02} – давление на выходе компрессора, Па;

p_{01} – давление на входе в компрессор, Па;

κ – отношение удельной теплоемкости газа при постоянном давлении к удельной теплоемкости при постоянном объеме.

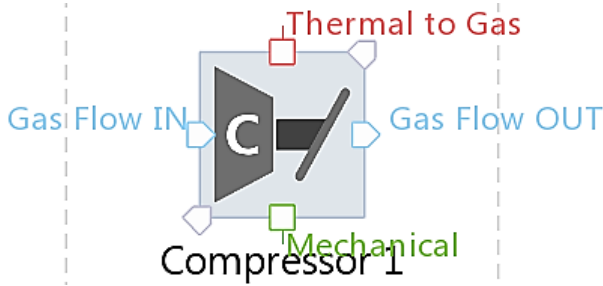


Рисунок 1.1.1 – Изображение элемента «Компрессор»

Тогда степень повышения давления в компрессоре π , скорректированная частота вращения вала компрессора n_{cor} , $1 / (\text{с} \cdot \text{К}^{0,5})$, и скорректированный массовый расход газа через компрессор \dot{m}_{cor} , $\text{кг} \cdot \text{К}^{0,5} / (\text{с} \cdot \text{Па})$, определяются следующим образом:

$$\pi = \frac{P_{02}}{P_{01}}, \quad (1.1.3)$$

$$n_{cor} = \frac{n}{\sqrt{T_{01}}}, \quad (1.1.4)$$

$$\dot{m}_{cor} = \frac{\dot{m} \cdot \sqrt{T_{01}}}{P_{01}}, \quad (1.1.5)$$

где T_{01} – характерная температура газа на входе в компрессор, К;

n – частота вращения вала компрессора, $1/\text{с}$.

Элемент «Компрессор» имеет следующие «порты»: входной и выходной газовой, тепловой и механический.

В зависимости от модели для элемента задаются:

1) упрощенная математическая модель: требуемая степень повышения давления и КПД компрессора (постоянное значение или зависимость от массового расхода газа в виде таблицы);

2) математическая модель на основе паспортной карты производительности компрессора (карта зависимости степени повышения давления и КПД от частоты вращения приводного вала и массового расхода газа (рисунок 1.1.2)).

В любом случае необходимо задать момент инерции вращающихся масс на валу компрессора.

Кроме того, можно учесть инерционные свойства газа.

В этом случае вместо установившегося значения массового расхода \dot{m} , кг/с, сначала определяется его производная по времени $d\dot{m}/dt$, согласно уравнению переходного баланса импульса, а затем осуществляется интегрирование (индексы «1» и «2» означают соответственно параметры входного и выходного «портов» элемента):

$$\frac{d\dot{m}}{dt} = A \cdot \left(\frac{[\rho u^2]_1 - [\rho u^2]_2}{l} + \frac{p_1 - p_2 - \Delta p_{mp}}{l} \right), \quad (1.1.6)$$

где A – характерная площадь сечения потока газа, м²;

ρ – плотность газа, кг/м³;

u – скорость движения газа, м/с;

l – характерный путь, пройденный потоком газа в компоненте, м;

p – давление газа, Па;

Δp_{mp} – потери давления газа на трение, Па.

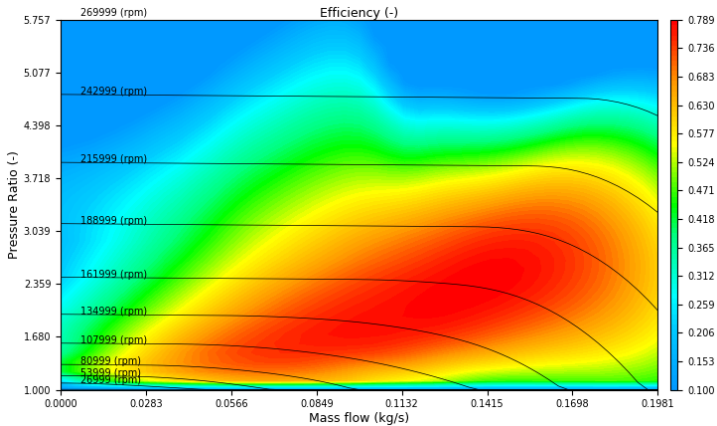


Рисунок 1.1.2 – Пример введенной в программу карты компрессора

1.2 Камера (Plenum)

Камера представляет собой объем, содержащий газ под давлением. В процессе моделирования газ может поступать в камеру и покидать ее.

Поскольку газовый тракт в AVL Cruise M рассчитывается как нуль-мерная система, камеры обычно используются для учета объемов конкретных участков трубопровода. Также камера, как компонент состояния, может использоваться для соединения между собой двух компонентов переноса.

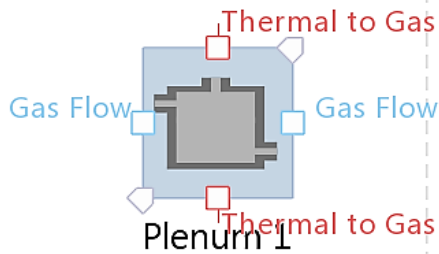


Рисунок 1.1 – Изображение элемента «Камера»

Для описания нестационарного наполнения и опорожнения камеры необходимы уравнения переходного баланса.

Материальный и энергетический баланс в камере в наиболее общем виде описывается следующим образом:

$$B \cdot \frac{d\Phi}{dt} = \sum F_{j,DS} - \sum F_{k,US}, \quad (1.1)$$

где B – матрица емкости;

Φ – вектор состояния, содержащий массу, энергию и массы компонентов газовой смеси;

$F_{j,DS}$ – вектор входящего потока на выходе j -го присоединенного элемента;

$F_{k,US}$ – вектор исходящего потока на стороне входа k -го присоединенного элемента.

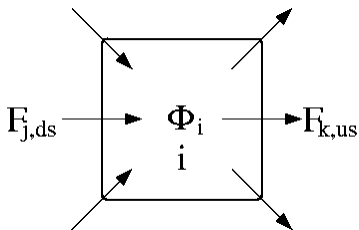


Рисунок 1.2.2 – Схема потоков для компонента «Камера»

Явное различие между входящим и исходящим потоками сделано для того, чтобы обеспечить возможность применения источниковых членов в присоединенных элементах.

В рамках численного интегрирования уравнений баланса рассматривается закон идеального газа, и все свойства газа, зависящие

от состояния, рассчитываются соответствующим образом.

Элемент «Камера» имеет следующие «порты» по умолчанию: два газовых и два тепловых.

В зависимости от модели для элемента задаются:

- 1) постоянный объем камеры;
- 2) переменный объем камеры (для моделирования камеры сгорания, объем которой изменяется со временем).

В любом случае необходимо задать начальные условия: давление, температуру и состав газов.

При включении **опции «Статические давление и температура»** потребуется ввести значение характерной площади A_{ref} и указать тип характерного массового расхода \dot{m}_{ref} : или входной поток $\dot{m}_{вх}$, или выходной поток $\dot{m}_{вых}$, или средний поток $\dot{m}_{сред}$. Статические условия обычно лучше сравниваются с экспериментальными данными, измеренными в трубообразных компонентах.

Данный вариант используется для оценки характерной скорости потока v_{ref} , м/с, в камере статического давления:

$$v_{ref} = \frac{\dot{m}_{ref}}{\rho \cdot A_{ref}}. \quad (1.2.2)$$

Учитывая, что компонент «Камера» присоединен к двум и более компонентам переноса, используется сумма всех массовых расходов на входе и выходе соответственно.

Характерная скорость потока v_{ref} используется для расчета статических давления p_{static} и температуры T_{static} газов в камере при

известных полных давления p_{total} и температуре T_{total} :

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{static} = p_{total} - \frac{\rho \cdot v_{ref}^2}{2} \\ T_{static} = T_{total} - \frac{v_{ref}^2}{2 \cdot C_p} \end{array} \right. . \quad (1.2.3)$$

Кроме того, характерная скорость потока v_{ref} также используется для оценки скорости потока в зависимости от корреляций теплопередачи в камере. Здесь обычно используются корреляции Нуссельта $Nu = f(Re, Pr)$, зависящие от числа Рейнольдса Re и числа Прандтля Pr :

$$Re = \frac{\rho \cdot v_{ref} \cdot \sqrt{A_{ref}}}{\mu}, \quad (1.2.4)$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda}, \quad (1.2.5)$$

где μ – динамический коэффициент вязкости газа, Па·с;

λ – коэффициент теплопроводности газа, Вт/(м·К).

1.3 Трубопровод для газа (Gas Flow Pipe)

Газопровод – это одномерный компонент газового тракта, предназначенный для моделирования газодинамических явлений внутри труб с особым акцентом на впускную и выпускную системы

двигателей.

Каждая труба разделяется на несколько ячеек одинакового размера Δx для решения основных дифференциальных уравнений в частных производных (дискретизация). При выборе целевого размера ячейки Δx следует учитывать его влияние на величину временного шага решателя, согласно критерию CFL.

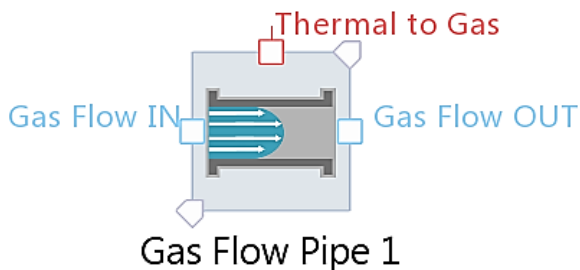


Рисунок 1.3.1 – Изображение элемента «Трубопровод для газа»

Изменение во времени интересующих параметров (например, давления) в определенных сечениях трубы можно фиксировать, добавляя соответствующие точки измерения. Их положение определяется одним из трех способов:

- по сетке (равномерное распределение);
- по относительному расстоянию от входа в трубу (относительно длины трубы);
- по абсолютному расстоянию от входа в трубу.

Элемент «Трубопровод для газа» имеет следующие «порты» по умолчанию: два газовых и один тепловой.

Предлагаются **три способа описания геометрии** газопровода:

- 1) диаметр и длина;
- 2) объем и длина;
- 3) площадь поперечного сечения и длина.

Кроме того, указывается гидравлический диаметр трубы, который используется для расчета характеристической скорости, используемой для расчета потерь давления на трение. Это можно использовать для моделирования пучка труб меньшего диаметра.

Для турбулентных течений задается либо коэффициент гидравлического трения, либо шероховатость внутренней поверхности трубопровода (в этом случае коэффициент гидравлического трения определяется на основе диаграммы Moody).

Для ламинарных течений есть возможность изменить константу в формуле для определения коэффициента гидравлического трения (согласно закону Хагена-Пуазейля, по умолчанию $64/Re$).

Кроме того, задается коэффициент формы поперечного сечения трубы:

- 1,0 – круглое сечение;
- 0,89 – квадратное сечение;
- 0,83 – сечение в виде равностороннего треугольника;
- 0,69 – синусоидальное сечение (канал, отношение высоты раскрытия к ширине раскрытия равно 0,425).

В любом случае необходимо задать начальные условия: давление, температуру и состав газов.

В ходе численного интегрирования уравнения Эйлера следует сосредоточиться на **управлении шагом по времени Δt** , с. Для достижения устойчивого решения должен соблюдаться критерий CFL (критерий устойчивости, определенный Курантом, Фридрихсом и Леви):

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{u + a}, \quad (1.3.1)$$

где a – скорость звука, м/с.

Это означает, что должно соблюдаться определенное соотношение между шагом по времени Δt и целевым размером ячейки Δx .

AVL Cruise M определяет зависимость временного шага от размера ячейки в начале расчета на основе заданных начальных условий в трубах.

Однако критерий CFL проверяется на каждом временном шаге расчета. Если критерий не соблюдается из-за существенного изменения условий течения в трубах, шаг по времени автоматически уменьшается.

Примечания:

1. Использование в модели компонента «Трубопровод для газа» автоматически изменяет решатель на единственный поддерживаемый в этом случае «Явный решатель по Эйлера с автоматическим временным шагом».

2. Критериями CFL можно управлять с помощью расширенной настройки параметра CFL_MULTIPLIER, чтобы уменьшить или увеличить временной шаг. Значение по умолчанию – 0,8.

Внутри каждой газопроводной трубы численный метод, используемый для аппроксимации движения газа, состоит в получении конечно-разностных аппроксимаций основных дифференциальных уравнений переноса массы, импульса и энергии.

Предполагая отсутствие трения и постоянство площади поперечного сечения трубопровода, **основные уравнения** приводятся к следующему виду (здесь x – продольная координата, м):

- уравнение переноса массы (уравнение неразрывности):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} = 0, \quad (1.3.2)$$

- уравнение переноса импульса:

$$\frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u^2 + p)}{\partial x} = 0, \quad (1.3.3)$$

- уравнение переноса энергии:

$$\frac{\partial(\rho \cdot e_0)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u \cdot h_0)}{\partial x} - q \cdot \rho = 0, \quad (1.3.4)$$

где e_0 – удельная внутренняя энергия газа, Дж/кг:

$$e_0 = e + \frac{u^2}{2}, \quad (1.3.5)$$

где e – удельная тепловая внутренняя энергия газа, Дж/кг;

h_0 – удельная полная энтальпия газа, Дж/кг:

$$h_0 = e_0 + \frac{p}{\rho}, \quad (1.3.6)$$

где q – удельная теплота, проходящая через стенку трубы, Вт/кг.

Решение с шахматной сеткой для газопровода работает путем разделения трубы на несколько различных ячеек. Переменные состояния (скалярные переменные) определяются в центрах ячеек (например,

давление и температура), а переменные потока (векторные переменные) – на границах ячеек (например, массовый расход и скорость).

Когда на границе требуются переменные состояния, они принимаются как среднее значение соседних ячеек. Когда для центров ячеек требуются переменные потока, они принимаются как среднее значение соседних границ. На рисунке 1.3.2 показан пример трубы, разделенной на 3 ячейки, и сетка решения, разделенная по времени и пространству.

Предполагается отсутствие трения, отсутствие начального потока и возрастающая разница давлений слева направо. Решение начинается с определения изменения внутреннего граничного потока на основе уравнения количества движения. Новый граничный поток определяется из центрированных значений соседних ячеек с предыдущего временного шага. Это показано синими линиями на рисунке 1.3.2, которые указывают, что граничные условия в момент времени t_1 определяются из условий ячейки в момент времени t_0 :

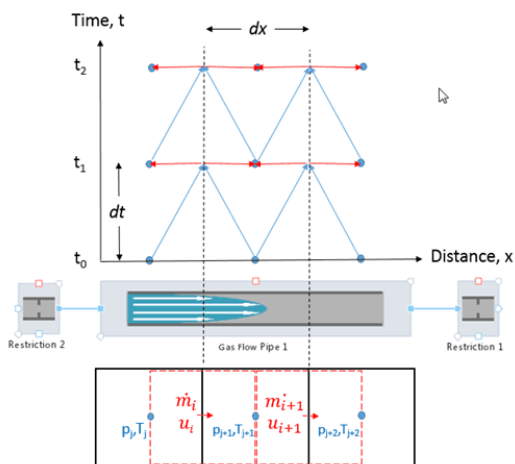


Рисунок 1.3.2 – Решение с шахматной расчетной сеткой для газопровода

$$f_{i,t1}^+ = \left\{ A \cdot (p_{j,t0} - p_{j+1,t0}) - (\dot{m}_{j,t0} \cdot u_{j,t0} - \dot{m}_{j+1,t0} \cdot u_{j,t0} - \dot{m}_{j+1,t0} \cdot u_{j+1,t0}) \right\} \frac{dt}{dx}. \quad (1.3.7)$$

Обновленный поток затем используется для расчета новой граничной скорости на основе площади потока A и плотности на границе, равной средней плотности соседних ячеек:

$$u_{i,t0} = \frac{f_{i,t1}}{\rho_{i,t0} \cdot A}. \quad (1.3.8)$$

Фактический массовый расход на границе для нового временно-го шага затем рассчитывается на основе новой граничной скорости, умноженной на площадь потока и плотность в исходной ячейке:

$$\dot{m}_{i,t1} = \rho_{j,t0} \cdot A \cdot u_{i,t1}. \quad (1.3.9)$$

Новая масса в ячейке затем определяется из разности массовых расходов на ее границах, умноженной на шаг по времени. Это показано красными линиями на рисунке 1.3.2, которые указывают, что условия ячейки в момент времени $t1$ определяются на основе обновленных граничных условий в момент времени $t1$:

$$m_{j+1,t1} = (\dot{m}_{i,t1} - \dot{m}_{i+1,t1}) \cdot dt. \quad (1.3.10)$$

Поток энергии рассчитывается аналогично массовому потоку, и новое состояние ячейки определяется на основе обновленных массы и энергии в ячейке:

$$P_{j+1,t} = f(m_{j+1,t}, E_{j+1,t}, \dots). \quad (1.3.11)$$

Таким образом, решение для расчетной сетки газопровода разнесено как во времени, так и в пространстве.

Уравнение количества движения для определения потока на границах решается между центрами ячеек (красные пунктирные прямоугольники на рисунке 2.3.1.2), а уравнения массы и энергии решаются для ячеек (черные ящики с синей точкой в центре на рисунке 2.3.1.2).

Обновленные массовые потоки на границах основаны на состояниях на предыдущем временном шаге, но обновленная масса (и энергия) в ячейках использует массовые потоки на границах с текущего временного шага.

Трение моделируется с использованием коэффициента трения Дарси f_D , также известного как коэффициент гидравлического трения в формуле Дарси-Вейсбаха, коэффициент сопротивления или просто коэффициент трения.

Сила трения $F_{friction}$, Н, применяется в уравнении количества движения как источниковый член (потери):

$$F_{friction} = \frac{f_D}{4} \cdot A_{surface} \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2}, \quad (1.3.12)$$

где $A_{surface}$ – площадь внутренней поверхности трубопровода, м².

1.4 Увлажнитель (Humidifier)

Увлажнитель – это компонент, используемый для увлажнения газового потока с низкой влажностью посредством газового потока с высокой влажностью.



Humidifier 1

Рисунок 1.4.1 – Изображение элемента «Увлажнитель»

Этот компонент часто применяется в системах топливных элементов для поддержания необходимой влажности на мембране. Увлажнитель имеет «сухую» (dry) и «влажную» (humid) стороны, которые разделены мембраной. Модель учитывает теплообмен и диффузионный массоперенос воды между этими сторонами.

Элемент «Увлажнитель» имеет по умолчанию 4 газовых «порта»: Gas Flow Dry A и Gas Flow Dry B используются для подключения компонента к сухой стороне газового тракта, Gas Flow Humid A and Gas Flow Humid B – для подключения компонента к влажной стороне газового тракта.

Увлажнитель моделируется как дискретизированный объемный компонент на основе подхода квазиодномерной модели потока, как схематически показано на рисунке 1.4.2.

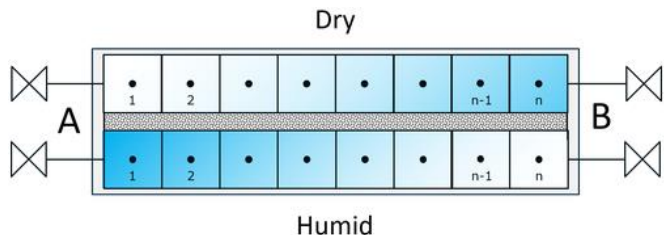


Рисунок 1.4.2 – Схема увлажнителя

Компонент может учитывать прямоточную и противоточную конфигурации. Это зависит от направлений потоков на «сухой» и «влажной» стороне. На каждой стороне имеется по два патрубка подачи газа «А» и «В». Прямоток достигается, если поток идет от А к Б с обеих сторон. Противоток устанавливается, если поток идет от А к В с одной стороны и от В к А с другой стороны.

Можно реализовать два варианта конструкции увлажнителя:

1) **пластинчатый** (рисунок 1.4.3);

В пластинчатых увлажнителях сухой и влажный каналы расположены параллельно и разделены мембраной.

Для данного типа конструкции необходимо установить:

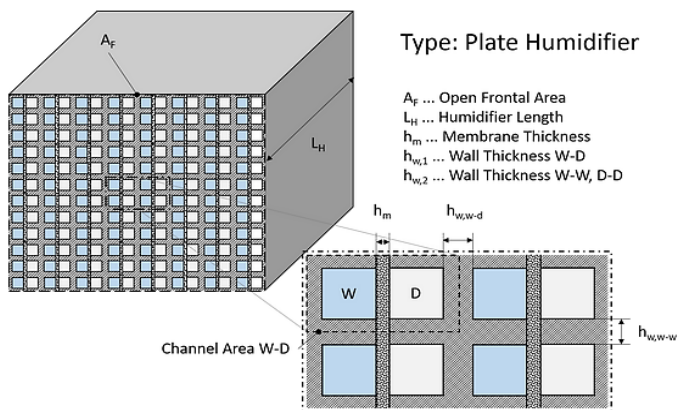


Рисунок 1.4.3 – Геометрия пластинчатого увлажнителя

- активную длину каналов;
- общую открытую фронтальную площадь увлажнителя (то есть фронтальную площадь, занятую каналами, стенками и мембранами);
- плотность каналов, то есть количество пар каналов на фронтальную площадь (пара каналов – это комбинация одного сухого и одного мокрого каналов);
- толщину стенки W-D между сухими и мокрыми каналами (го-

горизонтальное расстояние между каналами на рисунке 1.4.3);

- толщину стенки W-W D-D между двумя мокрыми каналами или двумя сухими каналами (расстояние по вертикали на рисунке 1.4.3);

- гидравлический диаметр, используемый для расчета теплообмена.

После ввода программа автоматически рассчитывает:

* количество каналов, используя общую открытую фронтальную площадь увлажнителя и плотность каналов;

* площадь мембраны (расчетная поверхность контакта каналов с мембраной);

* расчетный газовый объем каналов (одинаковый для сухих и мокрых).

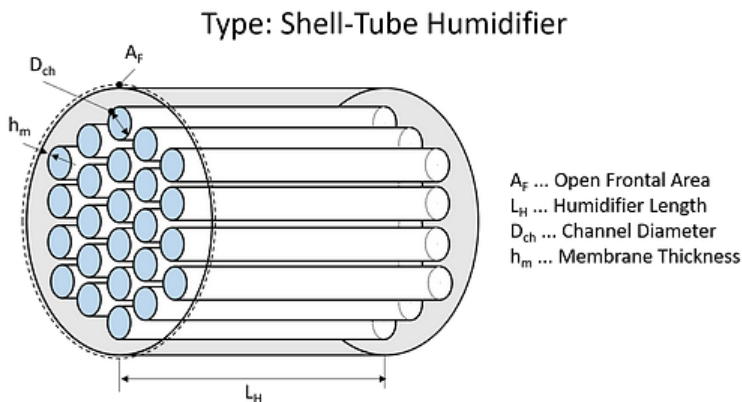


Рисунок 1.4.4 – Геометрия кожухотрубного увлажнителя

2) **кожухотрубный** (рисунок 1.4.4).

В кожухотрубных увлажнителях каналы из мембранного материала располагаются в трубе. Сухой поток проходит через каналы мембраны.

Для данного типа конструкции необходимо установить:

- активную длину каналов;

- общую открытую фронтальную площадь увлажнителя (то есть

фронтальную площадь, занятую каналами, стенками и мембранами);

- плотность каналов, то есть количество сухих каналов на фронтальную площадь;

- диаметр сухих каналов;

- гидравлический диаметр, используемый для расчета теплообмена.

После ввода программа автоматически рассчитывает:

* количество каналов, используя общую открытую фронтальную площадь увлажнителя и плотность каналов;

* площадь мембраны (расчетная поверхность контакта каналов с мембраной);

* расчетный объем влажного газового потока;

* расчетный объем газа в сухих проточных каналах.

В любом случае для компонента «Увлажнитель» необходимо задать:

• количество ячеек, используемых для дискретизации (чем больше ячеек, тем выше точность решения при более длительном времени расчета и меньшей стабильности модели);

• коэффициент масштабирования объема (хотя объем газа на сухой и влажной стороне рассчитывается по введенным геометрическим параметрам, можно увеличить данное значение, изменяя этот коэффициент, для повышения стабильности модели);

• положение измерительных точек: по сетке (равномерное распределение), по относительному расстоянию от входа A(относительно длины); по абсолютному расстоянию от входа A;

• параметры мембраны: материал из базы данных AVL Cruise M и толщина мембраны (меньшие значения приводят к увеличению тепло- и массообмена).

1.5 Теплообменник со стороны газа (Gas Heat Exchanger

Core)

«Теплообменник со стороны газа» используется для моделирования теплообмена между газом и присоединенным компонентом состояния («Системная граница» или «Стенка»).

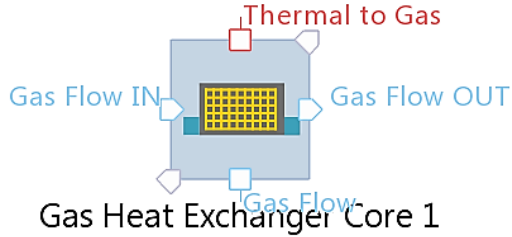


Рисунок 1.5.1 – Изображение элемента «Теплообменник со стороны газа»

Поток через данный компонент моделируется с учетом условий торможения газа в предыдущем компоненте состояния и условий в последующем компоненте состояния (через отверстие и прилегающую трубу).

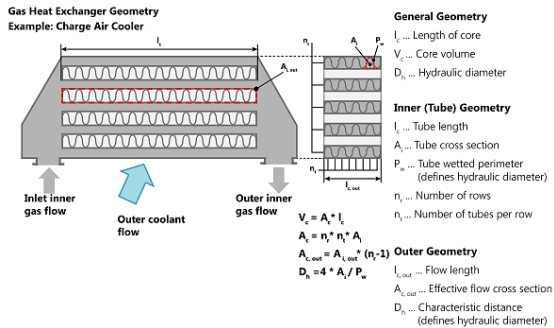


Рисунок 1.5.2 – Геометрические параметры интеркулера

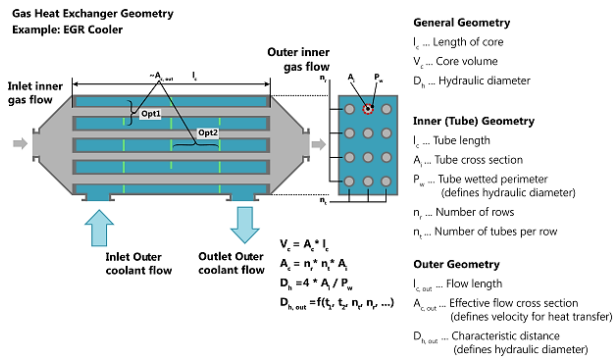


Рисунок 1.5.3 – Геометрические параметры охладителя EGR

Наиболее распространенным вариантом применения этого элемента является моделирование охладителя двигателя: интеркулер (охладитель наддувочного воздуха, рисунок 1.5.2) или охладитель EGR (охладитель системы рециркуляции отработавших газов, рисунок 1.5.3).

Если требуется уменьшение модели или компонент обеспечивает тепло- и массоперенос, обе функции можно активировать, подключив к теплообменнику соответствующие компоненты состояния («Стенка», «Топливный бак»).

Данный элемент также позволяет моделировать топливную пленку. Для этого необходимо присоединить компонент «Пленка на стенке» к тому же «порту», который используется для коммутации с компонентом «Топливный бак».

Элемент «Теплообменник со стороны газа» имеет следующие «порты» по умолчанию: три газовых (входной, выходной, нейтральный) и один тепловой.

Для ввода геометрических параметров есть три варианта:

1) Общая геометрия:

– объем и длина L активной зоны (для расчета геометрического проходного сечения, кроме того, второй параметр используется при

расчете потерь давления);

– гидравлический диаметр D_{hyd} (для расчета числа Рейнольдса);

2) Внутренняя (трубная) геометрия:

– длина внутренних трубок L ;

– поперечное сечение внутренней трубки;

– смоченный периметр поперечного сечения внутренней трубки;

– количество рядов трубок;

– количество трубок в ряду.

3) Внешняя геометрия:

– путь, пройденный потоком;

– эффективное поперечное сечение потока;

– характерный линейный размер (расстояние).

Для учета трения также существует три способа:

1. Целевое падение давления (указывается целевая потеря давления и эталонные условия, при которых оно было определено (массовый расход, температура на входе, давление на входе));

2. Коэффициент (вводятся данные о коэффициенте гидравлического трения при ламинарном и турбулентном режимах течения, как было описано в подразделе 1.3);

3. Таблица целевого падения давления (массовый расход, температура на входе, давление на входе и целевая потеря давления вводятся в табличной форме, предоставленной производителем теплообменника).

В любом случае необходимо задать коэффициент расхода (этот параметр вместе с геометрической площадью потока необходим для расчета эффективной площади потока).

Кроме того, можно учесть инерционные свойства газа.

В компоненте «Теплообменник со стороны газа» решаются

уравнения баланса для расчета падения давления (с учетом параметров торможения газового потока и падения давления из-за трения в трубках).

Тепловые потери через стенки моделируются физически с учетом условий течения в трубе. Для определения параметров расчета теплопередачи используется компонент «Теплоотдача» (Heat Transfer Connection) библиотеки «Теплотехника» VL Cruise M.

В результате моделирования определяются: массы, энтальпии, массовые расходы, скорости, числа Маха и Рейнольдса сред, коэффициенты трения и потери давления в трубках.

Модель падения давления обычно использует пристеночный коэффициент трения:

$$\Delta p = F_{fr} \cdot \zeta \cdot \frac{L}{D_{hyd}} \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2}. \quad (1.5.1)$$

Коэффициент ζ зависит от числа Рейнольдса и меняется в зависимости от режима течения:

– ламинарный режим:

$$\zeta = \zeta_l \text{ при } Re \leq Re_l \text{ 2300}; \quad (1.5.2)$$

– переходный режим:

$$\zeta = \zeta_l \cdot \left(1 - \frac{Re - Re_l}{Re_T - Re_l} \right) + \zeta_T \cdot \left(\frac{Re - Re_l}{Re_T - Re_l} \right) \text{ при } Re_l < Re < Re_T = 5600; \quad (1.5.3)$$

– турбулентный режим:

$$\zeta = \zeta_T \text{ при } \text{Re} \geq \text{Re}_T, \quad (1.5.4)$$

где ζ_l – коэффициент, для определения которого используется константа a (согласно закону Хагена-Пуазейля, $a = 64$):

$$\zeta_l = \frac{a}{\text{Re}}; \quad (1.5.5)$$

ζ_T – коэффициент, который считается постоянным или может быть рассчитан с использованием подхода, основанного на числе Рейнольдса:

$$\zeta_T = 4 \cdot \left(A + B \cdot \text{Re}^{\frac{-1}{m}} \right), \quad (1.5.6)$$

где A, B, m – коэффициенты.

* Потери давления в газовой части теплообменника можно настроить и с помощью утилиты «Мастер падения давления» (PDW) как комбинацию потерь давления на отверстиях (см. подраздел 1.7) и потерь давления из-за вязкого трения.

PDW позволяет корректировать общий перепад давления в соответствии с измерениями и для поддержки этого демонстрирует (рисунок 1.5.4) общий перепад давления (измерение – черный цвет, моделирование – красный цвет), а также доли отдельных подмоделей (синий и серый цвета).

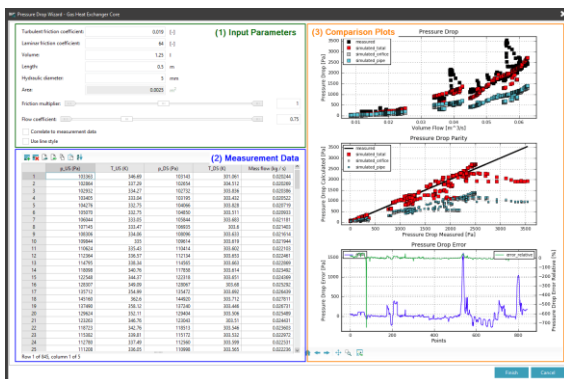


Рисунок 1.5.4 – Применение PDW к газовой части теплообменника

Порядок работы с утилитой PDW:

1. Выбор компонента и запуск PDW с панели инструментов (рисунок 1.5.5);
2. Указание входных параметров во левой верхней части открывшегося окна ((1) Входные параметры) (рисунок 1.5.4);
3. Загрузка данных измерений в левую нижнюю часть окна ((2) Данные измерений) с помощью опции Импорт или копирования и вставки из внешней программы (рисунок 1.5.4);
4. Изменение коэффициентов масштабирования и/или входных параметров для достижения хорошего соответствия между измеренным и моделируемым падением давления (увеличение параметра «Множитель трения» и уменьшение параметра «Коэффициент расхода» приводит к увеличению общего перепада давления и потерь давления на трение);
5. При достижении удовлетворительного соглашения нажимается кнопка «Готово». Значения, оцененные в PDW, учитываются в модели.

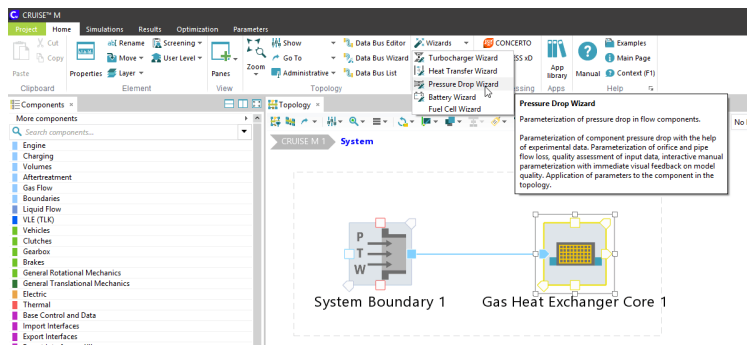


Рисунок 1.5.5 – Активация утилиты PDW

* Теплоотдачу газовой части теплообменника в окружающую среду или к охлаждающей жидкости можно настроить с помощью утилиты «Мастер теплопередачи» (HTW), предназначенной для параметризации теплопередачи в компонентах библиотеки «Газодинамика» с использованием набора данных измерений. HTW применим для установившихся и неуставившихся данных.

Цель HTW: оценка теплопередачи в соответствии с расчетной и измеренной температурой на выходе (рисунок 1.5.6).

Теплоотдача от газа к стенке основана на аналогии Рейнольдса и поэтому чувствительна к газодинамическим условиям.

Для передачи тепла от стенки к теплоносителю (или окружающей среде) используется постоянный коэффициент. Значение коэффициента по умолчанию зависит от типа охлаждающей жидкости (например, воздух или вода, неподвижная или движущаяся среда).

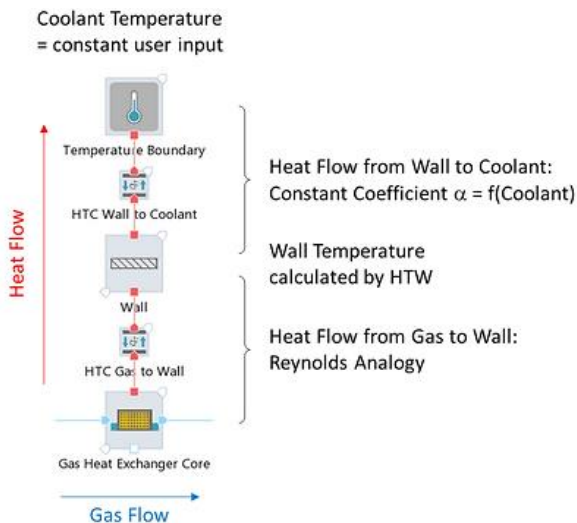


Рисунок 1.5.6 – Настройка теплопередачи HTW

Температура стенки также рассчитывается с помощью HTW. Для установившегося случая она вычисляется как квазистационарная. При переходных процессах температура стенки рассчитывается путем интегрирования дифференциального уравнения. Причем температура охлаждающей жидкости считается постоянной.

HTW можно использовать (без существующих соединений тепловых «портов») для газодинамического элемента переноса, то есть помимо газовой части теплообменника эту утилиту можно применить для сопротивления, воздушного фильтра, дросселя. После запуска HTW конфигурация теплопередачи формируется автоматически на основе входных данных и оцененных параметров калибровки.

На рисунке 1.5.7 показано окно утилиты HTW, разбитое на 3 области:

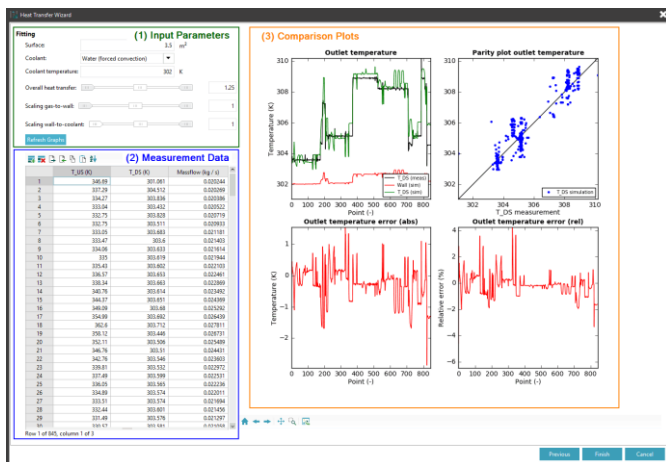


Рисунок 1.5.7 – Окно утилиты HTW (стационарный режим)

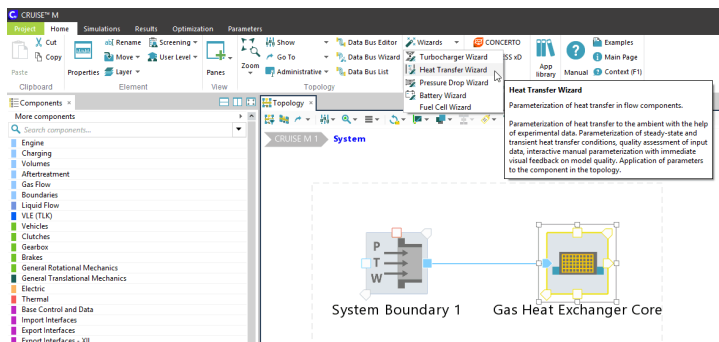


Рисунок 1.5.8 – Активация утилиты HTW

1. Входные параметры: содержит геометрические данные и параметры настройки;
2. Данные измерений: содержит температуру на входе (T_{US}), температуру на выходе (T_{DS}) и массовый расход. Для переходных процессов HTW содержит столбец «Время».
3. Сравнительные графики: показывает измеренные и смоделированные данные.

Порядок работы с утилитой HTW:

- 1) Выбор компонента и запуск HTW с панели инструментов (рисунки 1.5.8);
- 2) Выбор типа входных данных: стационарные или переходные;
- 3) Ввод входных параметров:
 - площадь теплообмена, используемая для внутренней (газ к стенке) и внешней (стенка к охлаждающей жидкости) теплоотдачи;
 - тип охлаждающей жидкости и условия течения, например, вынужденная конвекция (определяет значение по умолчанию для внешней теплоотдачи);
 - температура охлаждающей жидкости.
- 4) Загрузка данных измерений с помощью опции «Импорт» или копирование и вставка из внешней программы;
- 5) Нажатие кнопки «Обновить графики», чтобы отобразить результаты или обновить результаты после изменения входных данных;
- 6) Изменение коэффициентов масштабирования и/или входных параметров, чтобы добиться хорошего соответствия между измеренной и моделируемой температурой на выходе.

Рекомендации по настройке входных параметров и коэффициентов масштабирования, предполагая охлаждение газа (теплопередачу от газа к внешнему теплоносителю):

- Необходимо проверить, не находится ли температура охлаждающей жидкости ниже минимального значения температуры на выходе;
- В случае охлаждения температура стенки должна быть ниже температуры на выходе. Если это не так, значит, внешняя теплоотдача слишком слабая. Необходимо изменить коэффициент «Масштабирование стенки к охлаждающей жидкости» или выбрать другой вариант охлаждающей жидкости до достижения требуемой температуры стенки;
- Коэффициент «Общая теплопередача» применяется для

изменения уровня температуры между измеренным и смоделированным значениями.

1.6 Вентилятор (Fan)

Компонент «Вентилятор» используется для расчета массового расхода газа, нагнетаемого в выходной элемент, в зависимости от заданных условий давления (вверх по потоку и после него) и частоты вращения вала вентилятора.

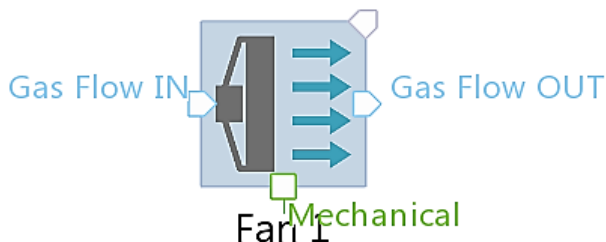


Рисунок 1.6.1 – Изображение элемента «Вентилятор»

Предполагается, что компонент работает в первом квадранте (положительный перепад давления при положительном массовом расходе) и не работает, например, в турбинных условиях эксплуатации.

Элемент «Вентилятор» имеет следующие «порты» по умолчанию: два газовых (входной и выходной) и один механический.

Для элемента «Вентилятор» **необходимо задать:**

1. Коэффициент полезного действия (КПД).

КПД вентилятора используется для уменьшения полезной мощности газового потока по сравнению с мощностью на валу.

Можно ввести:

- постоянный КПД;
- или таблицу зависимости КПД от массового расхода газа;
- или карту КПД, учитывающую влияние массового расхода и

частоты вращения вала вентилятора на КПД (применяется только в том случае, если «Вентилятор» соединен с механическим элементом, обеспечивающим крутящий момент при определенной переменной частоте вращения вала).



Рисунок 1.6.2 – Окно для ввода КПД вентилятора в виде карты

2. Повышение давления.

Это дополнительное давление, создаваемое вентилятором. Также можно рассматривать как увеличение давления в элементе ниже по потоку (по сравнению с элементом выше по потоку), при котором возможен определенный массовый расход.

Можно ввести:

- таблицу зависимости повышения давления от массового расхода газа (обычно максимальное повышение давления определяется при нулевом массовом расходе, а максимальный массовый расход – при нулевом повышении давления);
- или карту повышения давления, учитывающую влияние массового расхода и частоты вращения вала вентилятора на повышение

давления.

3. Частота вращения вала вентилятора.

Вводится как константа, причем только в том случае, если входной сигнал КПД или повышения давления задан в виде карты.

Если к элементу «Вентилятор» присоединен какой-либо механический элемент, ввод постоянной частоты вращения вала не доступен (частота рассчитывается программой).

4. Момент инерции.

Вводится только в том случае, если входной сигнал КПД или повышения давления задан в виде карты.

Кроме того, можно учесть инерционные свойства газа.

В целом, для элемента «Вентилятор» рассчитывается массовый расход газа, транспортируемый от предыдущего элемента состояния (например, камеры) к расположенному ниже по потоку элементу состояния.

Массовый расход вычисляется **путем интерполяции в пределах заданных входных таблиц или карт.**

В первом случае входная кривая (рост давления как функция массового расхода) инвертируется, и массовый расход интерполируется в области повышения давления с текущей заданной разностью давлений. Эта разница рассчитывается с использованием давлений двух присоединенных элементов состояния. Если доступная разность давлений выходит за пределы значений входной таблицы, применяется линейная экстраполяция. В случаях, когда может возникнуть отрицательный массовый расход, он ограничивается нулем.

Во втором случае (при вводе карты) применяется аналогичная процедура, дополнительно учитывающая влияние изменения частоты вращения вала вентилятора.

1.7 Сопротивление (Restriction)

Компонент «Сопrotивление» учитывает сопротивление движению газового потока и используется для моделирования массопереноса между компонентами состояния (например, между камерой и системой границей).

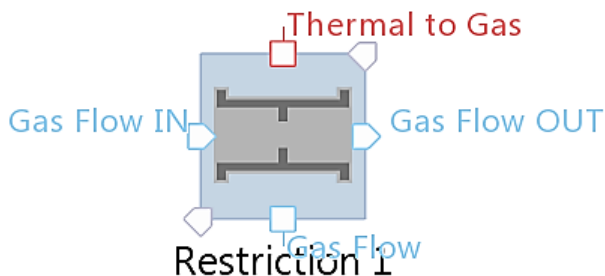


Рисунок 1.7.1 – Изображение элемента «Сопrotивление»

Поток через «Сопrotивление» моделируется, согласно уравнению массового расхода сжимаемого газа через отверстие. Дополнительно решаются уравнения баланса с учетом дополнительной массы и источника тепла.

Можно управлять сопротивлением этого элемента за счет изменения коэффициентов расхода через канал данных (для моделирования таких устройств, как дросселирующий клапан).

«Сопrotивление» можно использовать для моделирования карбюратора путем рассмотрения дополнительных массовых потоков.

Можно моделировать тепловые потери, а также учитывать топливные пленки.

Элемент «Сопrotивление» имеет следующие «порты» по умолчанию: три газовых (входной, выходной, нейтральный) и один тепловой.

В качестве геометрического параметра элемента «Сопrotивление» используется:

– характерная площадь поперечного сечения (для расчета эффективной площади потока);

– или характерный диаметр.

Дополнительно необходимо задать **коэффициенты расхода μ** :

* коэффициент расхода А используется для потока газа, движущегося через сопротивление в нормальном направлении (от входа к выходу).

* коэффициент расхода В используется для обратного течения газа.

Кроме того, можно учесть инерционные свойства газа.

Применяемое для элемента «Сопротивление» **уравнение массового расхода \dot{m}** , кг/с, сжимаемого газа через отверстие имеет вид:

$$\dot{m} = \mu \cdot A_{geom} \cdot p_{up} \cdot \sqrt{\frac{2}{R \cdot T_{up}}} \cdot \psi, \quad (1.7.1)$$

где A_{geom} – площадь отверстия, м²;

p_{up} – давление газа вверх по потоку (на входе), Па;

R – удельная газовая постоянная, Дж/(кг·К);

T_{up} – абсолютная температура газа вверх по потоку (на входе), К;

ψ – функция потока, зависящая от режима течения по числу Маха.

Для дозвуковых газовых течений:

$$\psi = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \left[\left(\frac{p_{down}}{p_{up}} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_{down}}{p_{up}} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]}, \quad (1.7.2)$$

где P_{down} – давление газа вниз по потоку (на выходе), Па.

Для сверхзвуковых газовых течений:

$$\psi = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{1}{\kappa - 1}} \cdot \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa + 1}}. \quad (1.7.3)$$

Аналогично, скорость движения газа u_{or} , м/с, в отверстии определяется выражением:

$$u_{or} = \sqrt{2 \cdot R \cdot T_{up} \cdot \nu}, \quad (1.7.4)$$

где ν – локальная вспомогательная функция.

Для дозвуковых газовых течений:

$$\nu = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_{down}}{P_{up}} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]}. \quad (1.7.5)$$

Для сверхзвуковых газовых течений:

$$\nu = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa + 1}}. \quad (1.7.6)$$

Потоки энтальпии и веществ, взятые из компонента состояния выше по потоку (на входе), рассчитываются путем умножения соответ-

ствующих значений вверх по потоку (входных) на массовый расход, заданный уравнением (1.7.1). Вообще это уравнение обычно используется для моделирования потока через сопротивления, дроссели и соответствующие элементы, подобные отверстиям.

Если эти элементы имеют изменяемое проходное сечение, например, дроссель, то в общем случае изменяется не только площадь, но и коэффициент расхода.

Чтобы уменьшить количество вычислительных операций и затраты на подготовку модели, часто для учета обоих эффектов вводят эффективную площадь:

$$A_{eff} = \mu \cdot A_{geom}. \quad (1.7.7)$$

Следовательно, в представленном случае значение A_{geom} сохраняется постоянным, и только значение коэффициента расхода μ регулируется для управления эффективной площадью A_{eff} и массовым расходом \dot{m} .

Уравнение имеет бесконечный градиент при равенстве давлений $P_{down} = P_{up}$, что может повлиять на стабильность системы уравнений математической модели.

Чтобы преодолеть эту проблему, можно предположить ламинарное течение при очень малых перепадах давления.

Этот подход основан на допущении, что существует порог:

$$\Pi_{tr} = \left| \frac{P_{down}}{P_{up}} \right|_{tr} < 1, \quad (1.7.8)$$

выше которого плавная аппроксимация вида:

$$\psi(\Pi) = a \cdot (\Pi - 1)^3 + b \cdot (\Pi - 1), \quad (1.7.9)$$

где a , b – коэффициенты:

$$a = \frac{\psi'_{tr} \cdot (\Pi_{tr} - 1) - \psi_{tr}}{2 \cdot (\Pi_{tr} - 1)^3}, \quad (1.7.10)$$

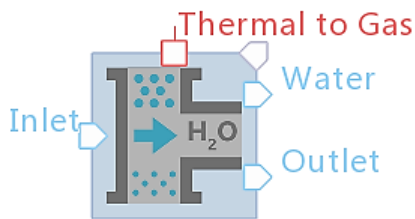
$$b = \psi'_{tr} - 3 \cdot a \cdot (\Pi_{tr} - 1)^3, \quad (1.7.11)$$

где ψ'_{tr} – производная ψ_{tr} по Π_{tr} .

Форма уравнения (1.7.9) гарантирует: конечный градиент при $\Pi = 1$, симметричное поведение вокруг $\Pi = 1$ и плавный переход к уравнению функции потока (1.7.2) при достижении порога Π_{tr} .

1.8 Сепаратор (Water Separator)

Сепаратор представляет собой компонент, предназначенный для удаления воды из данного газового потока. Такой компонент применяется, например, для управления содержанием воды в газах в топливных элементах.



Water Separator 1

Рисунок 1.8.1 – Изображение элемента «Сепаратор»

Компонент описывает падение давления в потоке по уравнению массового расхода сжимаемого газа через отверстие (см. подраздел 1.7) и эмпирически моделирует отделение воды.

Компонент можно использовать только для варианта задания состава газов типа «Перенос основных компонентов» (General Species Transport).

Элемент «Сепаратор» имеет следующие «порты» по умолчанию: три газовых (входной, выходной и для воды) и один тепловой.

Целевое значение влажности газов на выходе сепаратора определяется пользователем. Удаляемая вода покидает компонент через водяной «порт», который можно соединить с резервуаром («камера» или «топливный бак»).

На входе предлагаются **граничные условия** либо по давлению, либо по массовому расходу. В зависимости от этого выбора на входе можно подключить либо компонент состояния («камера», «системная граница» или «трубопровод для газа»), либо компонент переноса («сопротивление», «граница по массовому расходу газа»).

В качестве геометрического параметра элемента «Сепаратор» используется:

- характерная площадь поперечного сечения (для расчета эффективной площади потока);
- или характерный диаметр.

Дополнительно необходимо задать целевое значение относи-

тельной влажности газов на выходе сепаратора φ_{out} и коэффициенты расхода μ :

* коэффициент расхода А используется для потока газа, движущегося через сепаратор в нормальном направлении (от входа к выходу).

* коэффициент расхода В используется для обратного течения газа.

Кроме того, можно учесть инерционные свойства газа (только для входных граничных условий по давлению).

1.9 Системная граница (System Boundary)

Компонент «Системная граница» используется при указании условий окружающей среды (температуры, давления, влажности и состава газов) для газопроводной сети. Есть возможность задать эти параметры либо как постоянные значения, либо как табличные значения (зависимость от времени), либо получить значения через каналы данных.

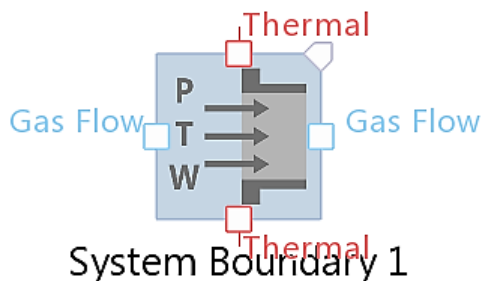


Рисунок 1.9.1 – Изображение элемента «Системная граница»

Элемент «Системная граница» имеет следующие «порты» по умолчанию: два газовых и два тепловых.

Для элемента «Системная граница» задаются:

1. Граничные значения давления и температуры газов;

2. Состав газов, включая влажность:

– для варианта задания типа **«Перенос классических компонентов» (Classic Species Transport)**:

- доля паров топлива;
- доля продуктов сгорания;
- тип коэффициента: соотношение «воздух-топливо» (A/F ratio) или коэффициент эквивалентности воздуха (Air Equivalence Ratio), или коэффициент избытка воздуха (Excess Air Ratio);
- начальное значение коэффициента (например, 10000 для параметров окружающей среды без паров топлива и без продуктов сгорания).

– для варианта задания типа **«Перенос основных компонентов» (General Species Transport)** доступны три способа:

1) Газовый контур (Gas circuit): тогда по умолчанию берутся фракции для сухого воздуха из входных данных в разделе «Состав газа».

Дополнительно можно учитывать влажность воздуха, продукты сгорания и пары топлива. Состав продуктов сгорания рассчитывается по стехиометрии. Для расчета содержания воды по влажности воздуха в качестве эталонных условий используются граничные давление и температура.

2) Влажные доли компонентов газовой смеси (Species fractions wet).

Вводятся мольные или массовые доли всех компонентов газовой смеси, включая воду.

3) Сухие доли компонентов газовой смеси с отдельным заданием влажности (Species fractions dry with air humidity).

Вводятся мольные или массовые доли всех компонентов газовой смеси, кроме воды.

Причем, для второго и третьего способов есть возможность получать значения долей всех компонентов газовой смеси из шины данных.

Кроме того, с помощью **опции «Перенос пассивных компонентов» (Passive Species Transport)** можно ввести массовые доли пассивных компонентов как функции времени (относящиеся к количеству пассивных частиц в газовой фазе).

Дополнительно для элемента «Системная граница» можно учесть эффекты набегающего на транспортное средство потока воздуха (**опция «Ram flow»**). Текущая скорость автомобиля передается в компонент «Системная граница» путем соединения соответствующего канала входной шины данных.

Если в модели присутствует компонент «Автомобиль» (Vehicle), то скорость транспортного средства берется программой оттуда непосредственно (привязка к шине данных не требуется).

При активации опции «Ram flow» задаются:

– множитель набегающего потока (для масштабирования внутреннего расчетного давления торможения на основе скорости транспортного средства);

– падение давления в набегающем потоке Δp_{RAM} , Па, одним из двух способов:

- прямой ввод (как постоянное значение падения давления или как функция от скорости автомобиля U);

- доля напора (расчет падения давления как доли ранее рассчитанного давления набегающего потока).

– множитель падения давления.

Тогда фактическое граничное давление системы p_1 , Па, рассчитывается по уравнению Бернулли для несжимаемого потока (1.9.1).

Этот подход обеспечивает достаточную точность по сравнению

с изоэнтропическими зависимостями (1.9.2), как показано на рисунке 1.9.2.

$$\begin{cases} p_1 = p_0 + \frac{\rho \cdot v^2}{2} \\ \Delta p_{RAM} = p_1 - p_0 \end{cases} \quad (1.9.1)$$

$$\begin{cases} T_1 = T_0 + \frac{1}{2 \cdot C_p} \cdot v^2 \\ p_1 = p_0 \cdot \left(\frac{T_1}{T_0} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \end{cases} \quad (1.9.2)$$

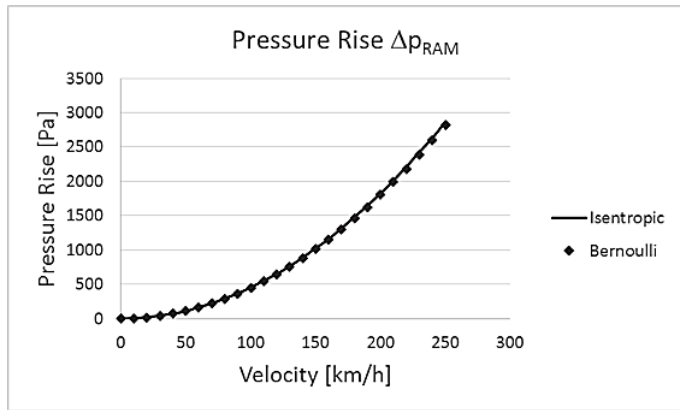


Рисунок 1.9.2 – Сравнение падения давления Δp_{RAM} , как функции скорости движения автомобиля для изэнтропического подхода и подхода Бернулли

Кроме того, граница позволяет учесть перенос газовой смесью твердых частиц с помощью опции «Particulate Matter Species Transport», активируемой в разделе «Состав газа»:

– источник входного сигнала: таблица или шина данных (по одному каналу шины данных для загрузки и распределения каждого вида твердых частиц), или газовый контур;

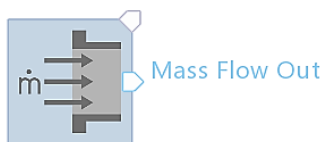
– загрузка твердых частиц: таблица с указанием времени и новой загрузки частиц (масса частиц в кг на 1 кг газовой смеси);

– распределение твердых частиц: таблица с указанием времени и нового распределения видов частиц (выделяется по столбцу для каждого вида твердых частиц, причем сумма по всем столбцам должна быть равна 1,0).

1.10 Граница по массовому расходу газа (Mass Flow Boundary)

Компонент «Граница по массовому расходу газа» используется для указания определенного граничного массового расхода для газопроводной сети. Кроме того, задаются температура, давление и состав газовой смеси.

Элемент «Граница по массовому расходу газа» имеет по умолчанию один газовый «порт».



Mass Flow Boundary 1

Рисунок 1.10.1 – Изображение границы по массовому расходу газа

Есть **возможность задать массовый расход** либо как постоянное значение, либо как табличные значения (зависимость от времени), либо получить значения через каналы данных.

Для давления, температуры, состава газовой смеси и т.п. особенности ввода данных полностью аналогичны рассмотренным для компонента «Системная граница» (см. подраздел 1.9). Однако опция «Ram flow» для этого элемента не доступна.

1.11 Топливный бак (Fuel Tank)

Компонент «Топливный бак» используется для моделирования источника жидкости (например, топлива). Компонент предоставляет информацию об израсходованной жидкости с момента начала моделирования.



Рисунок 1.11.1 – Изображение элемента «Топливный бак»

Элемент имеет один газовый «порт» для соединения с компонентом переходного массового расхода (но можно добавить несколько «портов»).

В качестве граничного условия указывается температура жидкости. Это значение необходимо для расчета удельной энтальпии. Если жидкость нагревается при сжатии или транспортировке, этот параметр можно отрегулировать, чтобы скомпенсировать нагрев.

$$\frac{dm}{dt} = \sum \dot{m}_i, \quad (1.11.1)$$

где m – текущее значение массы жидкости в баке, кг;

\dot{m}_i – i -й массовый расход присоединяемых компонентов расхода, кг/с.

Начальное условие, применяемое к производной массы резервуара по времени, предполагается равным нулю. Если массовый расход жидкости отрицателен (жидкость покидает бак), то масса жидкости в баке будет неуклонно уменьшаться в течение моделирования.

2. Примеры моделирования газодинамических процессов в программном пакете AVL Cruise M

2.1 Течение газа через местное сопротивление (отверстие)

Рассмотрим в программе AVL R2020.1 Cruise M задачу истечения сухого воздуха в течение 10 с через отверстие диаметром 10 мм из 1-го бесконечного объема с давлением 1,8 бар и температурой 30 °С во 2-й бесконечный объем с давлением 1 бар и температурой 30 °С. Учтем для газовой среды свойства сжимаемости и инерционности.

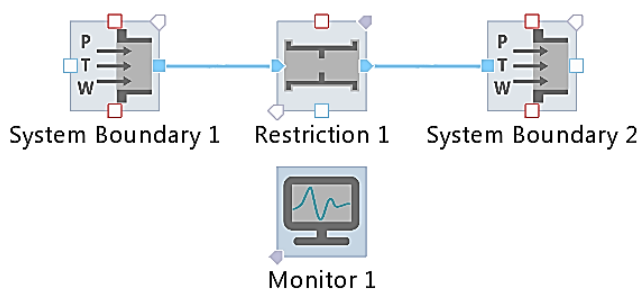


Рисунок 2.1.1 – Схема для моделирования течения газа через местное сопротивление (отверстие)

На рисунке 2.1.1 показана схема, построенная в программе для перечисленных условий задачи. 1-й бесконечный объем газа моделируется с помощью элемента «Системная граница 1» (System Boundary 1), 2-й бесконечный объем газа – с помощью элемента «Системная граница 2» (System Boundary 2), а отверстие, через которое будет двигаться газ – с помощью элемента «Сопротивление 1» (Restriction 1). Компонент «Монитор» (Monitor) необходим для контроля интересующих пользователя параметров в течение моделирования (с отображением, например, на графиках).

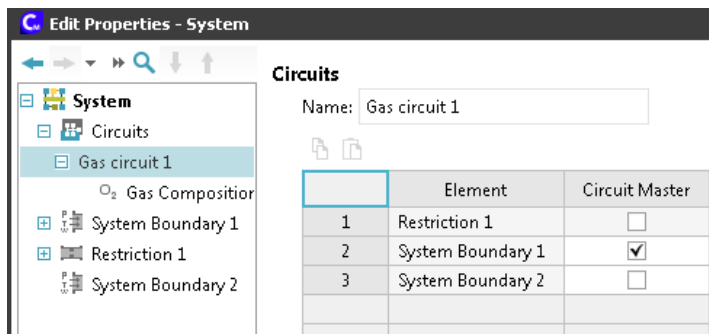


Рисунок 2.1.2 – Скриншот настройки «главного» элемента газового контура

В окне системных настроек файла AVL R2020.1 Cruise M (рисунок 2.1.2) укажем в качестве «главного» элемента газового контура (Circuit Master) компонент «Системная граница 1» (System Boundary 1).

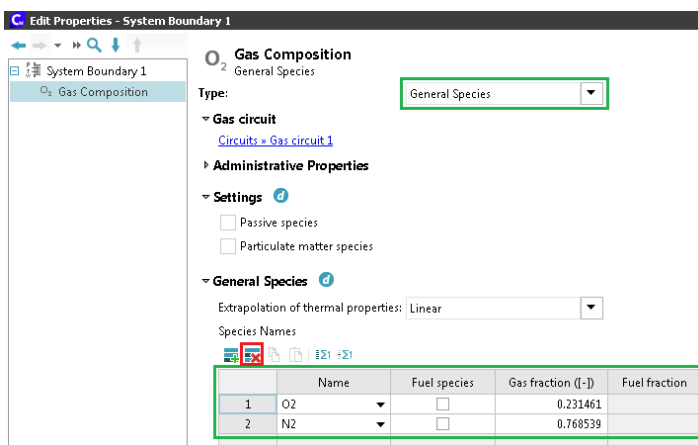


Рисунок 2.1.3 – Задание состава газовой смеси

«Главный» элемент выбирается пользователем для каждого независимого газового контура для последующего задания в его настройках состава газовой смеси.

В настройках «Состав газа» (Gas Composition) элемента «Системная граница 1» (System Boundary 1) выберем тип «Обычные

составляющие» (General Species) (рисунок 2.1.3). Затем удалим все лишние газы из таблицы с помощью специальной кнопки, оставив только азот N_2 и кислород O_2 (не будем учитывать остальные компоненты воздушной смеси – углекислый газ, водяной пар и др.). При этом необходимо убедиться, что сумма значений в колонке «Фракция газа» (Gas Fraction) равна 1.

Далее зададим параметры каждого элемента схемы:

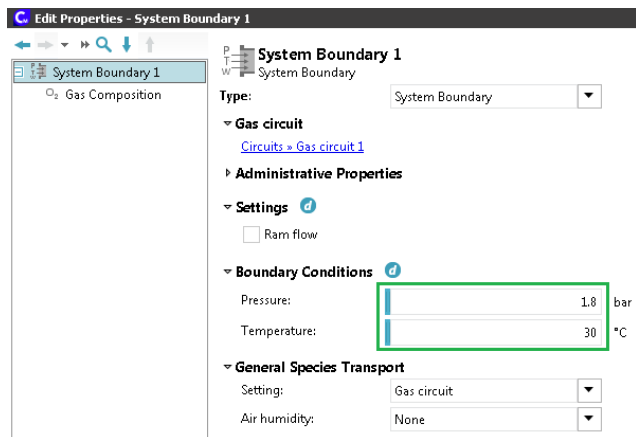


Рисунок 2.1.4 – Задание параметров элемента «Системная граница 1»

- 1) **«Системная граница 1»** (System Boundary 1) (рисунок 2.1.4):
 - абсолютное давление газа 1.8 бар;
 - температура газа 30 °С.
- 2) **«Системная граница 2»** (System Boundary 2) (рисунок 2.1.5):
 - абсолютное давление газа 1 бар;
 - температура газа 30 °С.

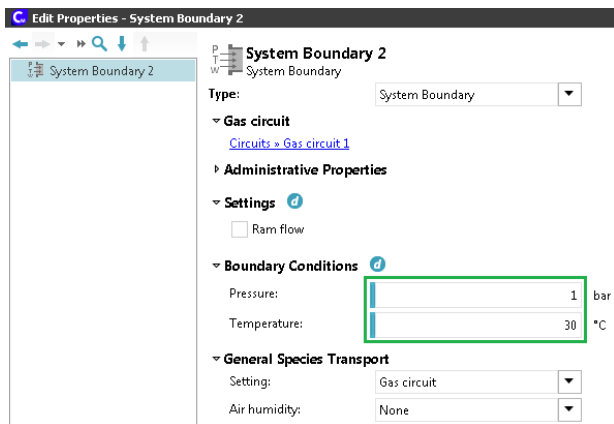


Рисунок 2.1.5 – Задание параметров элемента «Системная граница 2»

3) «Сопротивление 1» (Restriction 1) (рисунок 2.1.6):

- тип ввода данных – характерный диаметр;
- характерный диаметр (диаметр отверстия) 10 мм;
- коэффициент расхода А (для прямого потока газа слева направо по схеме) 1.0;
- коэффициент расхода В (для обратного потока газа справа налево по схеме) 0.0;
- уравнение переходного баланса импульса для учета инерционности газа (Transient momentum balance) – включено;
- множитель инерции (Inertia multiplier) 1.0.

Пусть в данной задаче будет один интересующий параметр – массовый расход воздуха через отверстие. Чтобы определить его для компонента «Монитор» (Monitor), есть, по крайней мере, два способа:

- указание параметра вручную в настройках компонента «Монитор» и последующее создание канала шины данных (Data bus);
- предварительное создание канала шины данных (Data bus) с последующим уточнением наименования и единиц измерения контролируемого параметра.

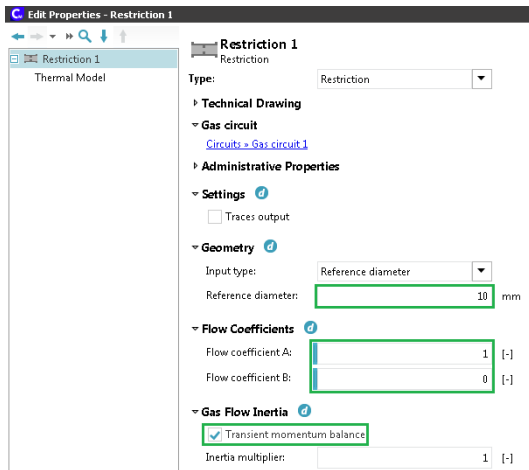


Рисунок 2.1.6 – Задание параметров элемента «Соппротивление 1»

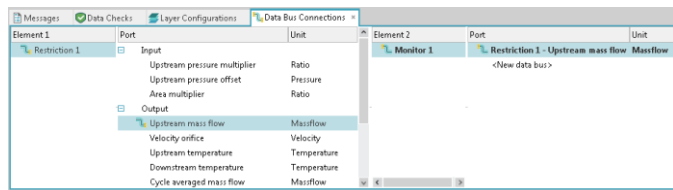


Рисунок 2.1.7 – Создание канала шины данных (Data bus)

Воспользуемся вторым способом. Для этого в нижней панели «Соединения шин данных» (Data bus) последовательно выбираем для компонента «Соппротивление 1» (Restriction 1) в перечне выходных параметров (Output) характеристику «Массовый расход на входе» (Upstream mass flow), а затем для компонента «Монитор» (Monitor) параметр «Новая шина данных» (New data bus). При этом программа создаст помимо шины данных новый входной параметр (Input) для компонента «Монитор» (Monitor) с названием «Соппротивление 1 - Массовый расход на входе» (Restriction 1 - Upstream mass flow) (рисунок 2.1.7).

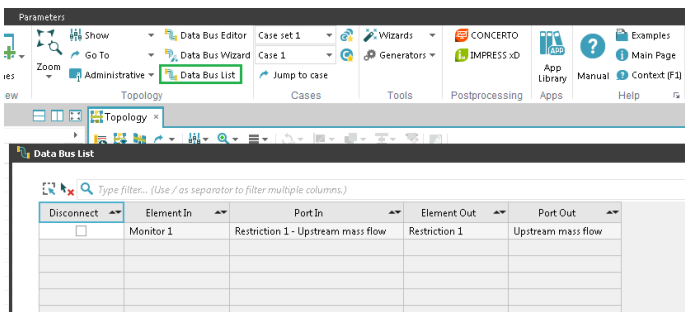


Рисунок 2.1.8 – Открытие окна «Список шин данных» (Data bus list)

Проконтролировать все созданные пользователем соединения шин данных удобно в виде общего перечня. Для этого нужно открыть окно «Список шин данных» (Data bus list) (рисунок 2.1.8).

Теперь проверим настройки компонента «Монитор» (Monitor), открыв вкладку «Определение шин данных» (Data bus Definition). Как видно из рисунка 2.1.9, в таблице «Входные параметры» (Inputs) появился характеристика «Сопротивление 1 - Массовый расход на входе» (Restriction 1 - Upstream mass flow) с размерностью кг/с (kg/s) без ограничений минимального и максимального значений.

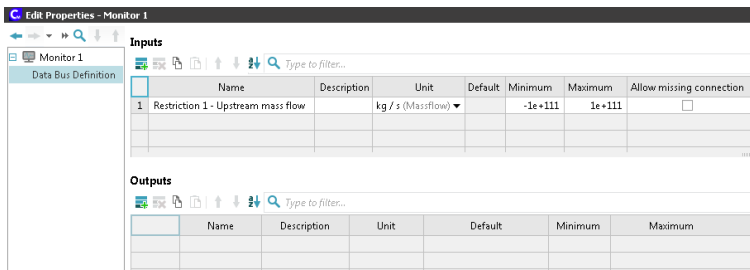


Рисунок 2.1.9 – Входные параметры элемента «Монитор»

Перейдем к параметрам явного решателя (Explicit Solver).

Убедимся в окне «Настройки» (Settings), что значение фиксированного шага по времени (Fixed step size) равно 0.001 с, а конечное время моделирования (End simulation time) – 10 с (рисунок 2.1.10).

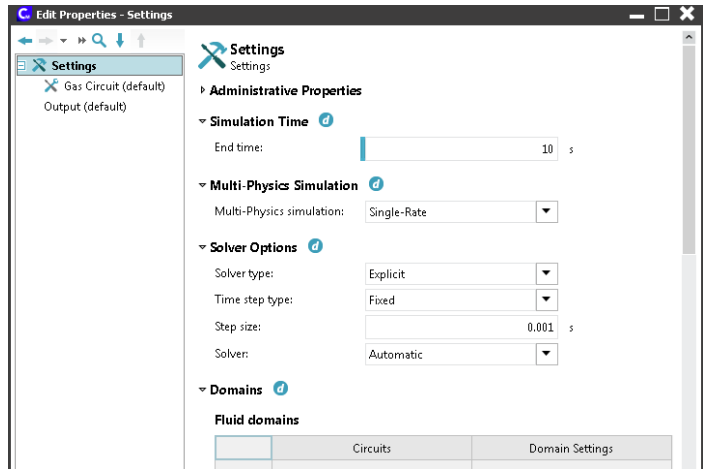


Рисунок 2.1.10 – Основные настройки решателя программы

Далее во вкладке «Вывод» (Output) этого окна (рисунок 2.1.11) укажем значение 1 для параметра «Вывод после каждого» (Output after every). В этом случае программа будет сохранять результаты моделирования на каждом временного шаге.

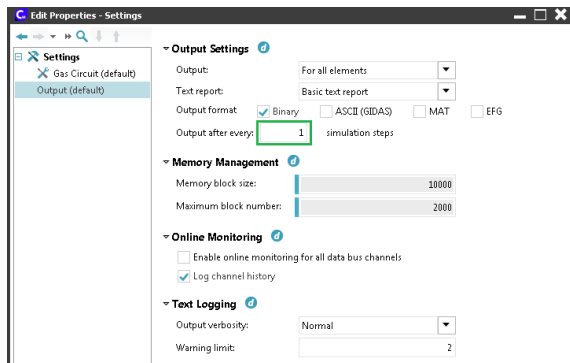


Рисунок 2.1.11 – Настройки сохранения результатов моделирования

Теперь перейдем из первой вкладки «Home» основного окна программы AVL Cruise M на вторую вкладку «Моделирование» (Simulation) и заготовим там график зависимости массового расхода воздуха на входе в отверстие от времени (рисунок 2.1.12).

Ограничим максимальное и минимальное значения массового расхода на оси ординат графика значениями 0.05 и -0.05 соответственно, переключив предварительно параметр «Ограничения» (Limits) на «Custom» (рисунок 2.1.13).

Далее сохраняем файл моделирования типа *.proj и **запускаем расчет**, нажав кнопку «Run» (рисунок 2.1.12).

Судя по графику на рисунке 2.1.14, значение массового расхода воздуха на входе в отверстие от времени в конце моделирования составило 0.02507 кг/с.

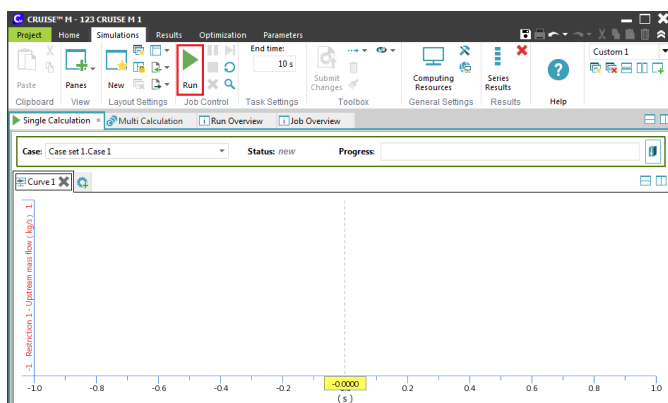


Рисунок 2.1.12 – Подготовка графика для контроля процесса моделирования

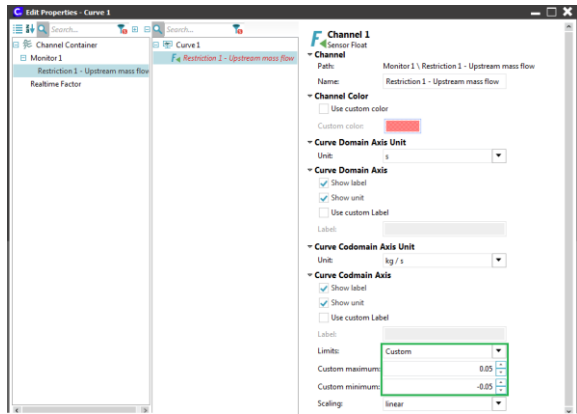


Рисунок 2.1.13 – Ограничения величин на оси ординат графика

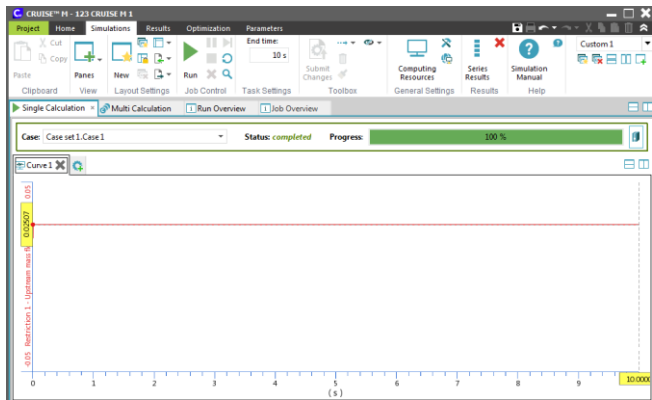


Рисунок 2.1.14 – График зависимости массового расхода воздуха на входе в отверстие от времени в конце моделирования

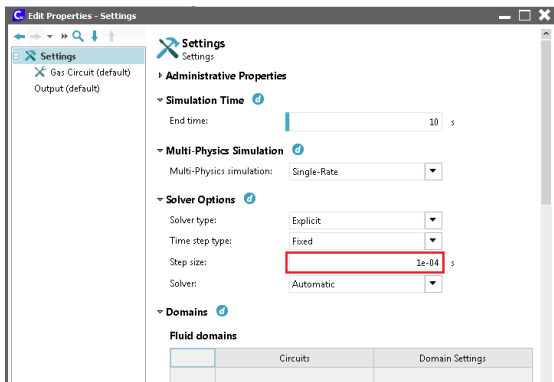


Рисунок 2.1.15 – Уменьшение шага по времени до 0.0001 с

Проверим влияние на результаты моделирования шага по времени, уменьшив его сначала до 0.0001 с (рисунок 2.1.15) и перезапустив расчет.

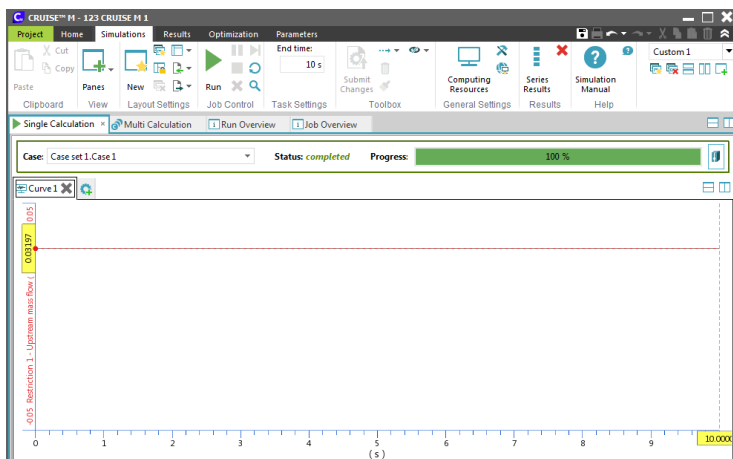


Рисунок 2.1.16 – Решение для шага по времени до 0,0001 с

Итак, массовый расход воздуха на входе в отверстие в конце моделирования увеличился до 0.03197 кг/с (на 27.5%), поэтому необходимо попробовать еще раз уменьшить шаг по времени, например, до 0,00001 с (рисунок 2.1.17) и провести расчет повторно.

Как следует из рисунка 2.1.18, массовый расход воздуха вырос до 0.03265 кг/с (еще на 2%).

Таким образом, уменьшение шага по времени от 0.0001 с до 0.00001 с не существенно повлияло на результаты моделирования, поэтому дальнейшие расчеты будем вести при шаге 0.0001 с.

Далее проверим влияние местного сопротивления на массовый расход воздуха при прежнем перепаде давлений. Уменьшим коэффициент А (для прямого потока газа слева направо по схеме) с 1.0 до 0.5 (рисунок 2.1.19), что эквивалентно уменьшению площади поперечного сечения отверстия в 2 раза.

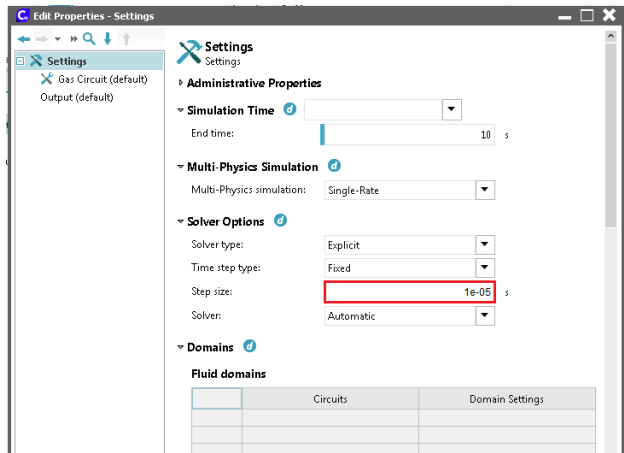


Рисунок 2.1.17 – Уменьшение шага по времени до 0,00001 с

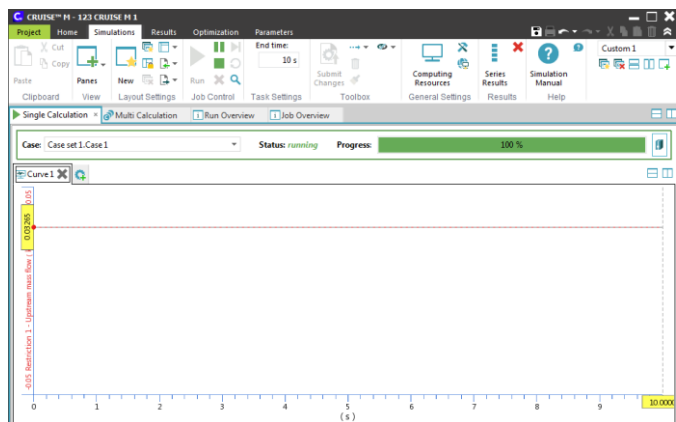


Рисунок 2.1.18 – Решение для шага по времени до 0.00001 с

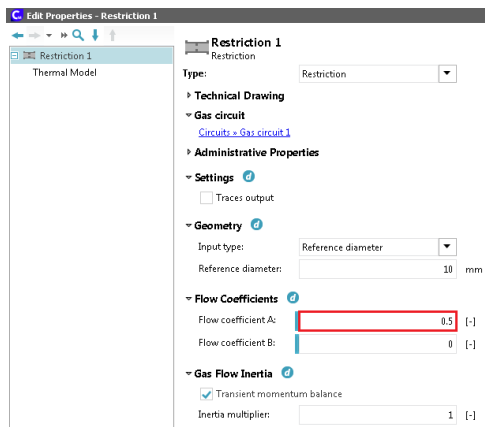


Рисунок 2.1.19 – Уменьшение коэффициента А сопротивления до 0.5

Как видно после перезапуска и окончания расчета (рисунок 2.1.20), массовый расход воздуха ожидаемо снизился до 0.0156 кг/с.

Теперь установим для элемента «Сопротивление 1» (Restriction 1) значение коэффициента А (для прямого потока газа слева направо по схеме) на 0.0, а коэффициента В (для обратного потока газа справа налево по схеме) – на 0.5 (рисунок 2.1.21), и перезапустим моделирование.

В этом случае имитируется работа обратного пневмоклапана, который приоткрыт при движении газа обратно (справа налево по схеме) и заперт при прямом направлении потока (слева направо по схеме). Поскольку перепад давления остался прежним (1.8 бар слева и 1 бар справа), массовый расход через элемент «Сопротивление 1» (Restriction 1) должен быть равен нулю.

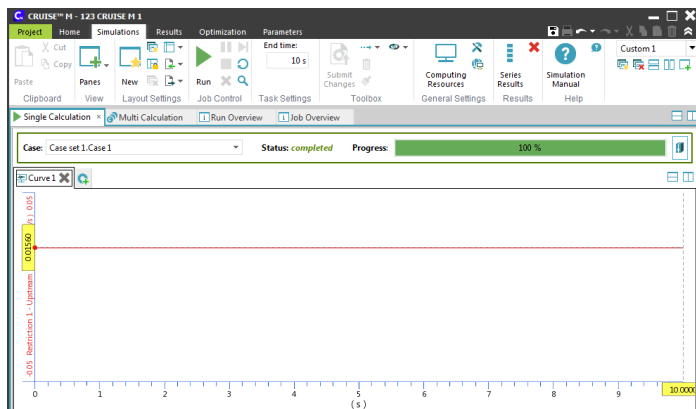


Рисунок 2.1.20 – Решение при снижении коэффициента А до 0.5

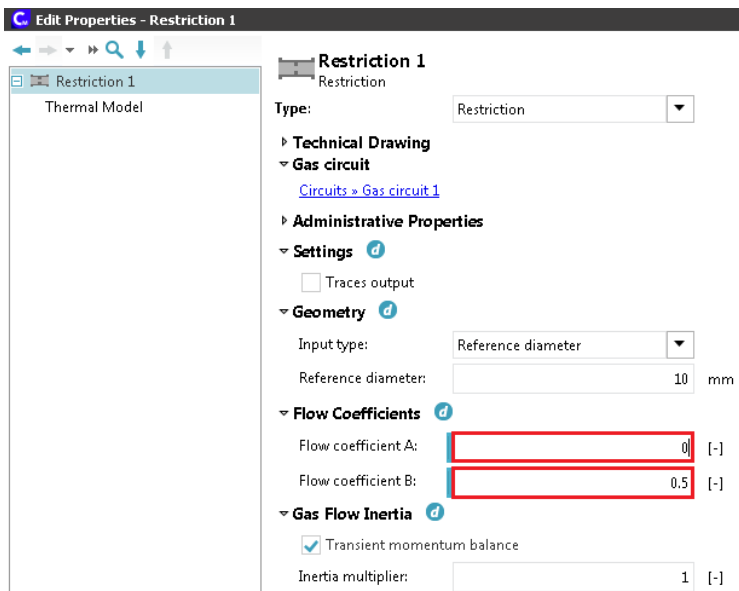


Рисунок 2.1.21 – Установка коэффициентов А и В на 0.0 и 0.5 соответственно

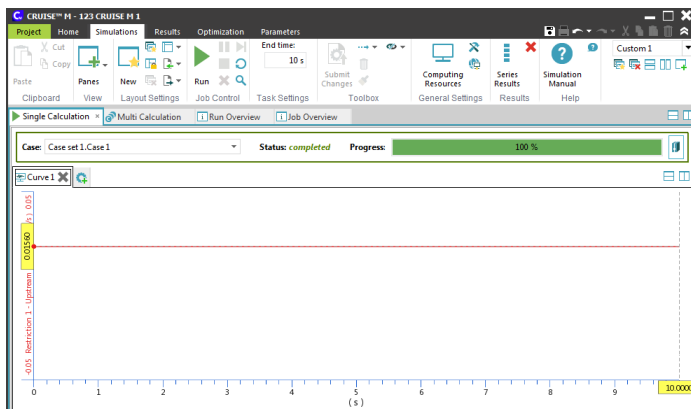


Рисунок 2.1.22 – Решение при коэффициентах А и В элемента «Сопротивление 1» (Restriction 1), равных 0.0 и 0.5 соответственно

Действительно, судя по полученной зависимости массового расхода воздуха на входе в отверстие от времени (рисунок 2.1.22), пневмоклапан «Сопротивление 1» (Restriction 1) закрылся и движение воздуха прекратилось.

Теперь оставим значения коэффициентов А и В без изменения, но скорректируем перепад давлений на пневмоклапане. Увеличим давление для компонента «Системная граница 2» (System Boundary 2) до 2.6 бар (рисунок 2.1.23) и перезапустим моделирование.

При исходном значении давления 1.8 бар для компонента «Системная граница 1» (System Boundary 1) получается прежний перепад давлений 0.8 бар, но теперь его направление изменилось (давление справа относительно отверстия выше, чем давление слева).

Поэтому представляется логичным, что пневмоклапан раскрылся, и массовый расход воздуха через него составил -0.01695 кг/с (рисунок 2.1.24). Здесь отрицательное значение расхода говорит об обратном течении воздуха справа налево по схеме.

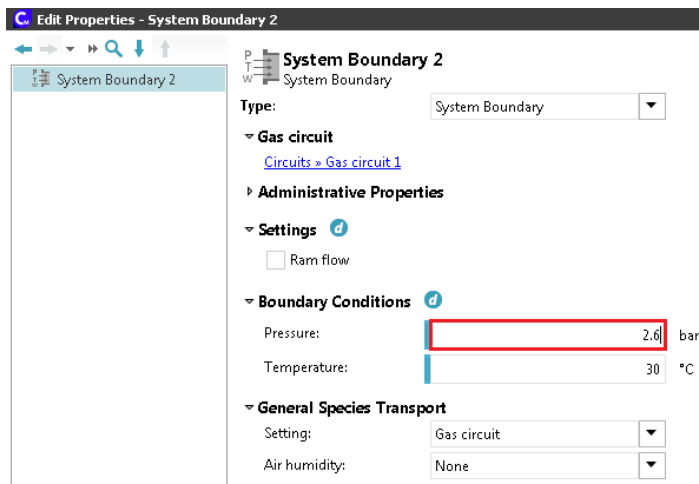


Рисунок 2.1.23 – Изменение параметров элемента «Системная граница 2»

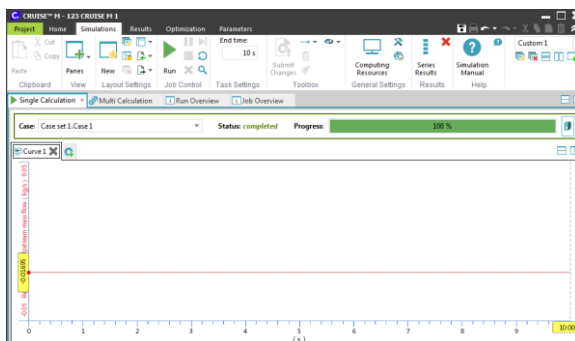


Рисунок 2.1.24 – Решение при увеличении давления для компонента «Системная граница 2» (System Boundary 2) до 2.6 бар при значениях коэффициентов А и В, равных 0.0 и 0.5 соответственно

2.2 Заполнение камеры газом

Теперь решим в программе AVL R2020.1 Cruise M задачу про заполнение камеры воздухом в течение 10 с из бесконечного объема с давлением 1,3 бар и температурой 30 °С через отверстие диаметром 10 мм при коэффициенте расхода 0,2. Пусть объем камеры составляет

100 л, а начальные давление и температура в ней равны 1 бар и 30 °С соответственно. Снова учтем для газовой среды свойства сжимаемости и инерционности. Стенки камеры будем рассматривать как идеально теплоизолированные (адиабатные).

Будем использовать схему предыдущей задачи (рисунок 2.1.1) с некоторыми изменениями. Сначала удалим элемент «Системная граница 2» (System Boundary 2). Затем добавим элемент «Камера 1» (Plenum 1) (рисунок 2.2.1).

Примечание: использование предыдущей схемы не является обязательным, можно создать новый файл и собрать всё «с нуля».

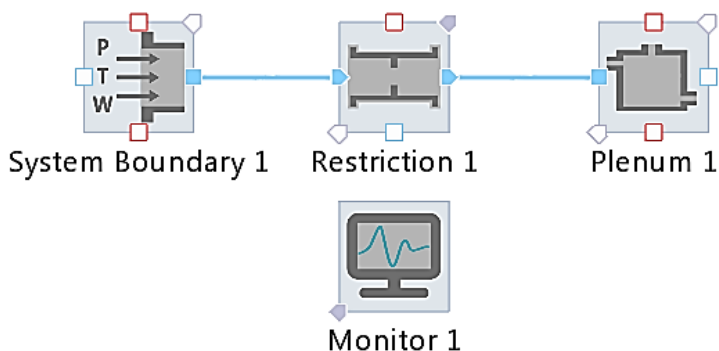


Рисунок 2.2.1 – Схема для моделирования заполнения камеры газом

Итак, в схеме, построенной в программе для условий 2-й задачи (рисунок 2.2.1) бесконечный объем газа моделируется с помощью элемента «Системная граница 1» (System Boundary 1), отверстие, через которое будет двигаться газ – с помощью элемента «Сопротивление 1» (Restriction 1), а теплоизолированная камера постоянного объема – с помощью элемента «Камера» (Plenum 1). Компонент «Монитор» (Monitor) снова будет использоваться для контроля интересующих параметров в течение моделирования.

Убедимся, что в окне системных настроек файла AVL Cruise M в качестве «главного» элемента газового контура (Circuit Master) по-прежнему выбран компонент «Системная граница 1» (System Boundary 1) (рисунок 2.1.2). Проверим, что в настройках «Состав газа» (Gas Composition) данного элемента остался выбранным тип «Обычные составляющие» (General Species), причем сухой воздух представлен смесью только азота N_2 и кислорода O_2 (рисунок 2.1.3).

Далее зададим параметры каждого элемента схемы:

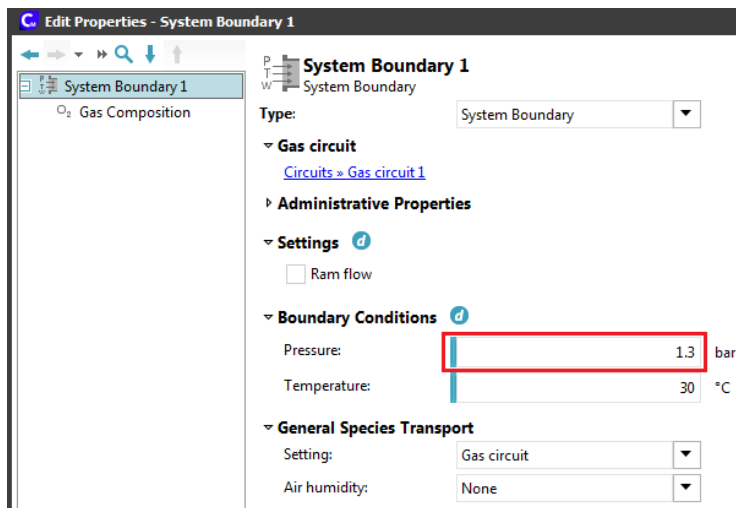


Рисунок 2.2.2 – Задание параметров элемента «Системная граница 1»

- 1) «Системная граница 1» (System Boundary 1) (рисунок 2.2.2):
 - абсолютное давление газа 1.3 бар;
 - температура газа 30 °С.
- 2) «Соппротивление 1» (Restriction 1) (рисунок 2.2.3):
 - тип ввода данных – характерный диаметр;
 - характерный диаметр (диаметр отверстия) 10 мм;

- коэффициент расхода А (для прямого потока газа слева направо по схеме) 0.2;
- коэффициент расхода В (для обратного потока газа справа налево по схеме) 0.0;
- уравнение переходного баланса импульса для учета инерционности газа (Transient momentum balance) – включено;
- множитель инерции (Inertia multiplier) 1.0.

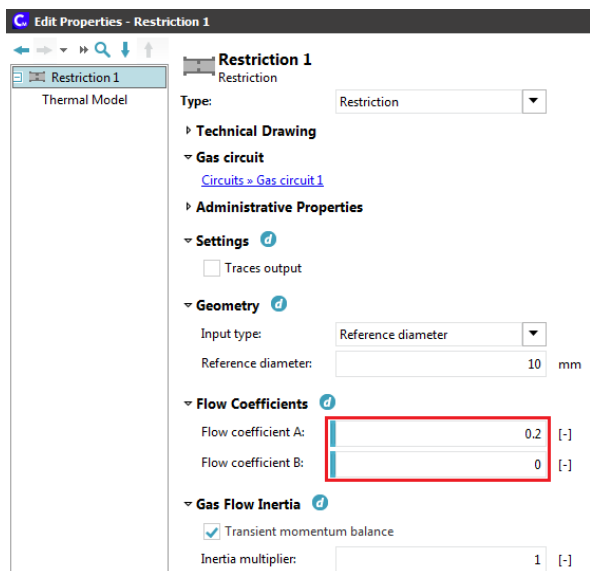


Рисунок 2.2.3 – Задание параметров элемента «Соппротивление 1»

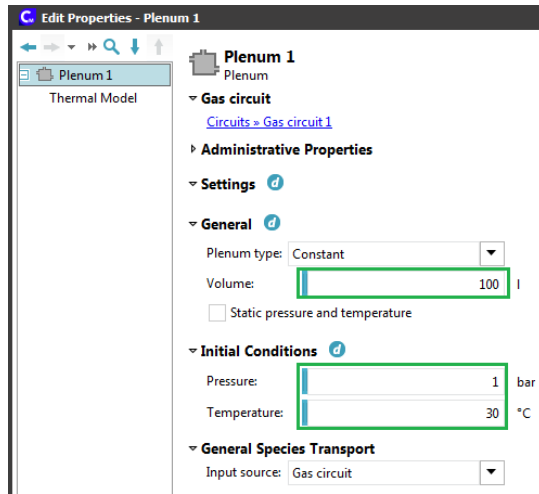


Рисунок 2.2.4 – Задание параметров элемента «Камера 1»

3) «Камера 1» (Plenum 1) (рисунок 2.2.4):

- тип камеры – камера постоянного объема;
- объем камеры 100 л;
- начальное абсолютное давление газа 1 бар;
- начальная температура газа 30 °C.

Пусть в данной задаче помимо массового расхода воздуха через отверстие в качестве интересующего параметра будет выбрано дополнительно абсолютное давление воздуха в камере.

Сначала убедимся, что в нижней панели «Соединения шин данных» (Data bus) по-прежнему установлена шина данных между массовым расходом на входе в сопротивление (отверстие) и между элементом «Монитор» (Monitor), как было показано на рисунке 2.1.7. То есть в элементе «Монитор» (Monitor) в качестве входного остался параметр «Сопроотивление 1 - Массовый расход на входе» (Restriction 1 - Upstream mass flow) (рисунок 2.1.9).

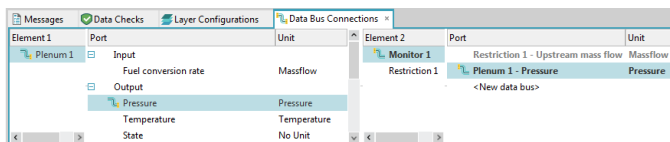


Рисунок 2.2.5 – Создание канала шины данных (Data bus)

Далее в нижней панели «Соединения шин данных» (Data bus) последовательно выбираем для компонента «Камера 1» (Plenum 1) в перечне выходных параметров (Output) характеристику «Давление» (Pressure), а затем для компонента «Монитор» (Monitor) параметр «Новая шина данных» (New data bus). При этом программа создаст помимо шины данных новый входной параметр (Input) для компонента «Монитор» (Monitor) с названием «Камера 1 - Давление» (Plenum 1 - Pressure) (рисунок 2.2.5).

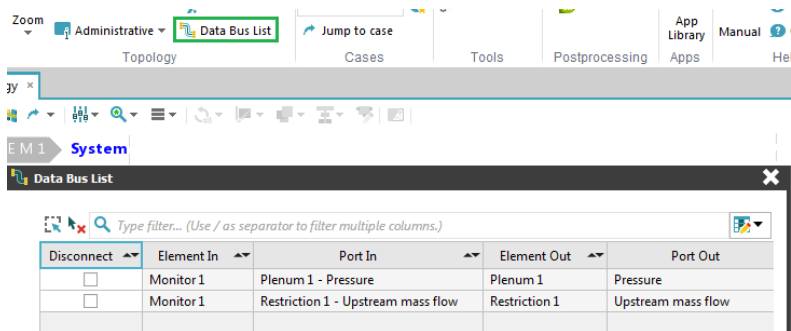


Рисунок 2.2.6 – Открытие окна «Список шин данных» (Data bus list)

Вызвав окно «Список шин данных» (Data bus list) (рисунок 2.2.6), еще раз убедимся, что в файле создано 2 канала шины данных (массовый расход воздуха через отверстие и давление в камере).

Теперь перейдем в настройки компонента «Монитор» (Monitor), открыв вкладку «Определение шин данных» (Data bus Definition). Изменим в таблице «Входные параметры» (Inputs) единицы измерения

характеристики «Камера 1 - Давление» (Plenum 1 - Pressure) с «Па» (Pa) на «бар» (bar) (рисунок 2.2.7). Оба входных параметра компонента «Монитор» (Monitor) оставим без ограничений минимального и максимального значений.

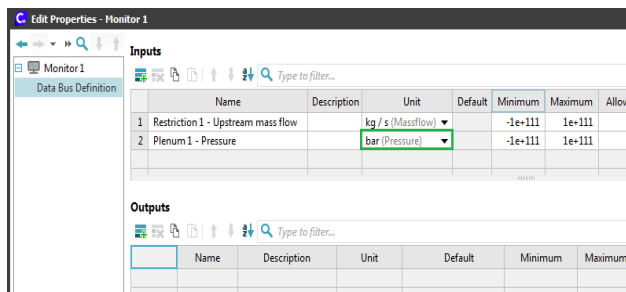


Рисунок 2.2.7 – Входные параметры элемента «Монитор»

Убедимся в окне «Настройки» (Settings), что **параметры решателя** остались без изменений (рисунки 2.1.11, 2.1.15):

- явный решатель (Explicit Solver);
- фиксированный шаг по времени (Fixed step size) 0.0001 с;
- конечное время моделирования (End simulation time) 10 с;
- во вкладке «Вывод» (Output) параметр «Вывод после каждого» (Output after every) равен 1 (сохранение результатов моделирования на каждом временном шаге).

Теперь перейдем из первой вкладки «Home» основного окна программы AVL Cruise M на вторую вкладку «Моделирование» (Simulation) и добавим график зависимости абсолютного давления воздуха в камере от времени (рисунок 2.2.8).

Кроме того, снимем ограничения на максимальное и минимальное значения массового расхода на оси ординат 1-го графика, вернув параметр «Ограничения» (Limits) из положения «Custom» в положение «Global» (рисунок 2.2.9).

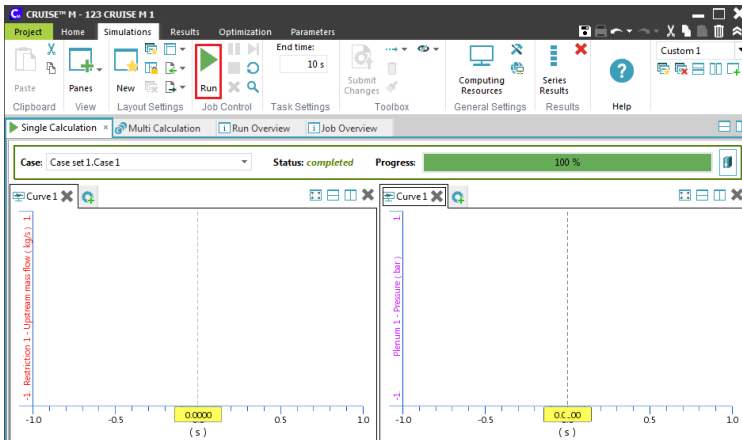


Рисунок 2.2.8 – Подготовка графиков для контроля процесса моделирования

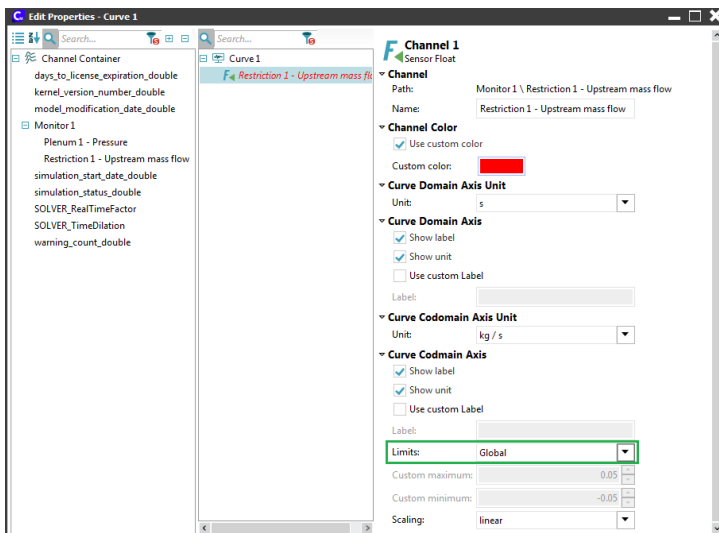


Рисунок 2.2.9 – Ограничения величин на оси ординат графика

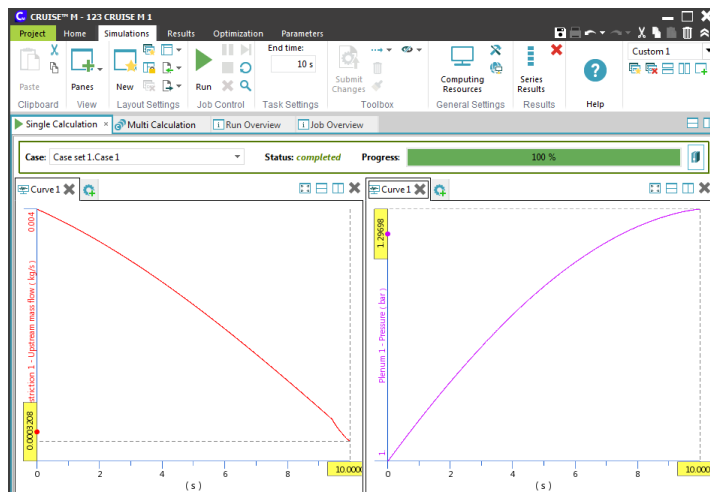


Рисунок 2.2.10 – Графики зависимости от времени массового расхода воздуха на входе в отверстие и абсолютного давления воздуха в камере (в конце моделирования)

Далее сохраняем файл моделирования типа *.proj и **запускаем расчет**, нажав кнопку «Run» (рисунок 2.2.8).

Судя по графикам на рисунке 2.2.10, абсолютное давление воздуха в камере по мере ее заполнения увеличивается со временем (с 1 бар до 1.297 бар за 10 с), вследствие чего массовый расход воздуха на входе в отверстие уменьшается (с 0.004 кг/с до 0.00032 кг/с за 10 с).

Далее перейдем из второй вкладки «Моделирование» (Simulation) основного окна программы AVL Cruise M на третью вкладку «Результаты» (Results) и выделим пункт «Вариант расчета 1» (Case 1) в верхней части правого окошка «Обозреватель данных» (Data Browser) (рисунок 2.2.11).

При этом сразу происходит считывание всех результатов моделирования, сохраненных в подпапке Simulation (она создается в папке, где сохранен основной файл моделирования типа *.proj, автоматически при запуске пользователем расчета).

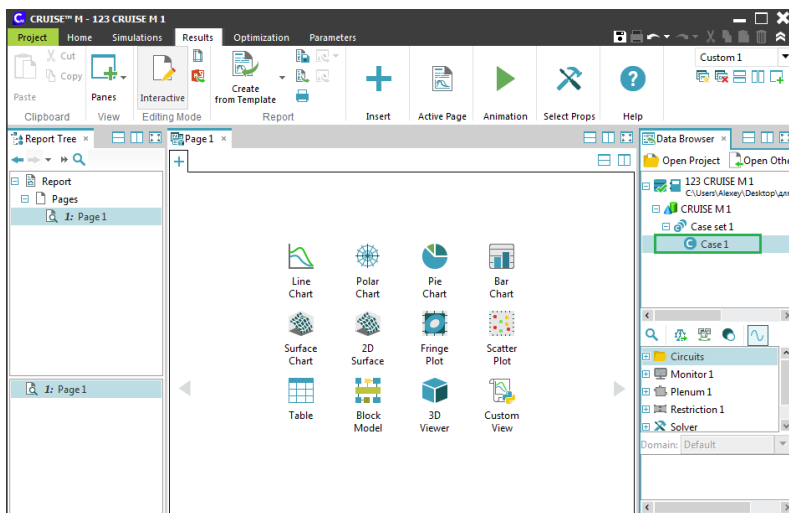


Рисунок 2.2.11 – Вкладка «Результаты» (Results)

Выделим в средней части правого окошка «Обозреватель данных» (Data Browser) пункт «Камера 1» (Plenum 1), а затем в нижней части этого же окошка «перетащим», держа нажатой левую клавишу мыши, пункт «Статическое давление» (Pressure Static) в центральное окно «Страница 1» (Page 1) к значку «Линейный график» (Line Chart).

После отпускания левой клавиши мыши график будет создан в центральном окне программы автоматически (рисунок 2.2.12), причем в нижней части левого окошка «Дерево отчетов» (Report Tree) появится новый пункт «Линейный график 1» (Line Chart 1).

Можно еще активировать полезный инструмент, отображающий значения функции и аргумента в любой интересующей пользователя точке кривой, если нажать специальную кнопку (показана над графиком на рисунке 2.2.12). Появятся желтые таблички со значениями на осях абсцисс и ординат графика, которые можно смещать левой клавишей мыши. Эти таблички всегда связаны с определенной точкой кривой на графике с помощью штриховых линий. Если на графике

построены несколько кривых разного цвета, то для удобства пользователя рядом с желтыми табличками оси ординат программой будут показаны крупные точки соответствующего цвета.

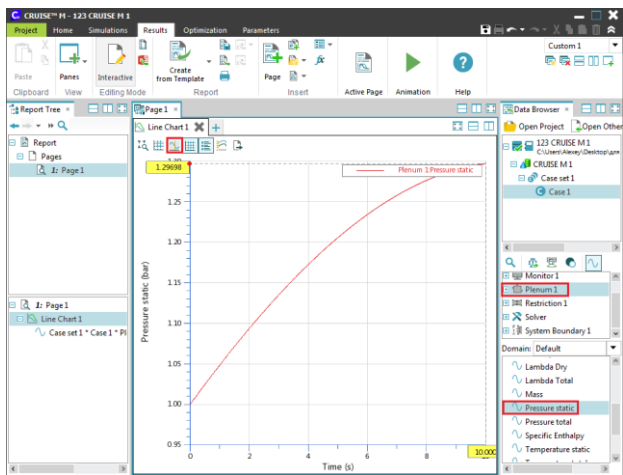


Рисунок 2.2.12 – График зависимости давления в камере от времени

Аналогично строится график зависимости массового расхода воздуха на входе в отверстие от времени (рисунок 2.2.13). Для этого сначала выделяется пункт «Соппротивление 1» (Restriction 1), разворачивается список папок с его параметрами (для этого нужно нажать левой клавишей мыши значок «+» слева от пункта), выбирается папка «Параметры на входе» (US), а затем – пункт «Массовый расход» (Mass Flow). Здесь также можно включить инструмент отображения значений функции и аргумента в любой точке кривой.

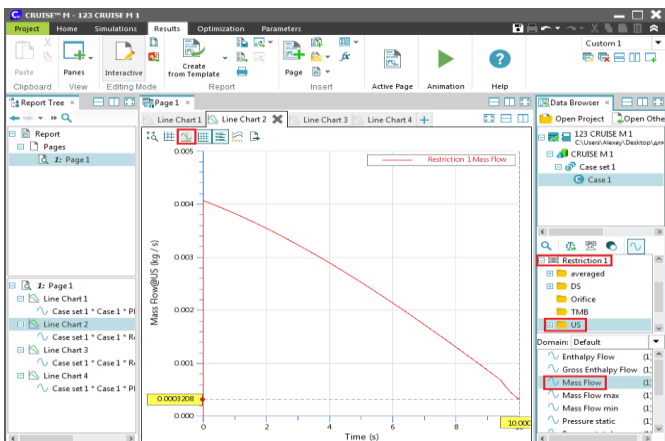


Рисунок 2.2.13 – График зависимости массового расхода воздуха на входе в отверстие от времени

Таким же образом далее построим график зависимости числа Маха в потоке воздуха от времени для компонента «Сопروتивление 1» (Restriction 1) (рисунок 2.2.14). Видно, что начальное значение числа Маха составило около 0,625, что соответствует дозвуковому режиму течения. Со временем эта величина убывает (до 0,05773 на 10-й секунде), так как массовый расход воздуха (рисунок 2.2.13) и, следовательно, скорость воздушного потока уменьшаются.

Наконец отобразим график зависимости температуры воздуха в камере от времени (рисунок 2.2.15). Поскольку стенки камеры по условию задачи теплоизолированные, а объем газа в камере возрастает, температура сжимающегося газа также увеличивается (до 51,159 °C на 10-й секунде).

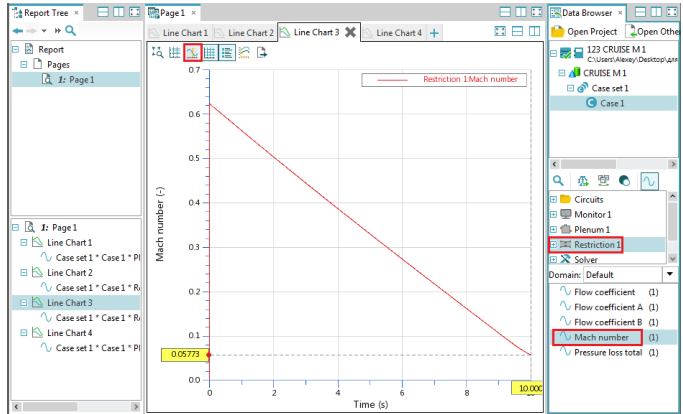


Рисунок 2.2.14 – Зависимость числа Маха в потоке воздуха от времени

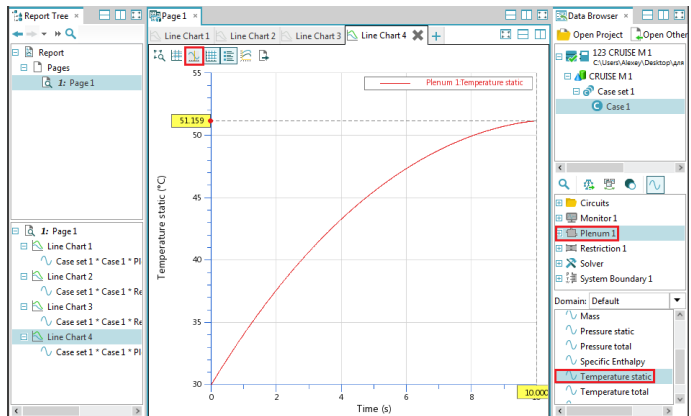


Рисунок 2.2.15 – Зависимость температуры воздуха в камере от времени

Литература

1. AVL Cruise M 2020 R1: The vehicle system simulation platform / AVL List GmbH, 2020. – Загл. с титул, экрана. – Электронная программа : электронная.

2. Глазков, В. В. Техническая газодинамика : учебное пособие / В. В. Глазков. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 108 с. – ISBN 978-5-8114-3010-9. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/212960> (дата обращения: 23.12.2023). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

3. Кузнецов, Ю. В. Насосы, вентиляторы, компрессоры / Ю. В. Кузнецов, А. Г. Никифоров. – 3-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2024. – 304 с. – ISBN 978-5-507-47367-0. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/364508> (дата обращения: 23.12.2023). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

4. Карпов, К. А. Прикладная гидрогазодинамика : учебное пособие / К. А. Карпов, Р. О. Олехнович. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 100 с. – ISBN 978-5-8114-3180-9. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/213017> (дата обращения: 23.12.2023). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

5. Круглов, Г. А. Теплотехника / Г. А. Круглов, Р. И. Булгакова, Е. С. Круглова. – 4-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 208 с. – ISBN 978-5-507-45269-9. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/263066> (дата обращения: 23.12.2023). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

Учебное издание

Карелин Дмитрий Леонидович
Болдырев Алексей Владимирович
Болдырев Сергей Владимирович

**ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ AVL CRUISE M
В ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ**

Учебно-методическое пособие

Редактор
Г.Ф. Таипова

Компьютерная верстка
А.И. Габдуллин

Подписано к использованию: 19.06.2024

Гарнитура «Times New Roman»
Усл. печ. л. 4,47. Уч.-изд. л. 1,61.
Заказ № 1828

Отдел информации и связей с общественностью
Издательско-полиграфический центр
Набережночелнинского института
Казанского (Приволжского) федерального университета